

**METAL-ORGANİK
KİMYASAL BUHARLAŞTIRMA
YÖNTEMİ İLE
KRİSTAL BÜYÜTME (MOCVD)
SİSTEMİNİN İNCELENMESİ**

**Hüseyin EKİNCİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI
2008**

**METAL-ORGANİK KİMYASAL BUHARLAŞTIRMA YÖNTEMİ İLE
KRİSTAL BÜYÜTME (MOCVD) SİSTEMİNİN İNCELENMESİ**

Hüseyin EKİNCİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

Danışman: Prof. Dr. Sezai ELAGÖZ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ'NE

Bu çalışma jürimiz tarafından, Fizik Ana Bilimdalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Hüseyin SARI

Üye : Prof. Dr. Sezai ELAGÖZ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hülya DOĞAN

ONAY

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

..../..../2008

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Prof. Dr. Sezai ELAGÖZ

Bu tez Cumhuriyet Üniversitesi Senatosunun 05.01.1984 tarihli toplantısında kabul edilen ve daha sonra 30.12.1993 tarihinde C.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğünce hazırlanan ve yayınlanan ‘Yüksek Lisans ve Doktora tez yazım kılavuzu’ adlı yönergeye göre hazırlanmıştır.

ÖZET**Yüksek Lisans Tezi****METAL-ORGANİK KİMYASAL BUHARLAŞTIRMA YÖNTEMİ İLE
KRİSTAL BÜYÜTME (MOCVD) SİSTEMİNİN İNCELENMESİ****Hüseyin EKİNCİ****Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü****Ağustos-2008****Danışman: Prof. Dr. Sezai ELAGÖZ**

Bu çalışmada, üniversitemiz bünyesinde Fizik bölümü öncülüğünde kurulan MOCVD sistemi detaylıca incelendi. MOCVD, nanoyapıların yapımında kullanılan önemli bir tek kristal büyütmeye "Epitaxial Growth" sistemidir. Ülkemizde N-tabanlı ikinci As/P tabanlı ilk sistem olan bu sistemin kapasitesi ve diğer sistemler ile karşılaştırılması oldukça önemli bir çalışma konusu olup, bu konuda çalışacak genç araştırmacılar için çok önemli bir kaynak olacaktır. Kristal büyütmeye sisteminin genel prensipleri araştırıldıktan sonra, özellikle III-V grubu heteroyapı yarıiletken malzemeler ile yapılan bazı nano-aygıtlar incelenerek, yapımı muhtemel yapıların analizi yapılacaktır.

ANAHTAR KELİMELELER: Tek-Kristal Büyütme Teknikleri, LPE, VPE, CVD, MBE, MOCVD, III-V Grubu Yarıiletkenler, III-N, LED, LD, PD.

SUMMARY

MSc Thesis

**AN INVESTIGATION OF METAL-ORGANIC CHEMICAL VAPOR
DEPOSITION (MOCVD) CRYSTAL GROWTH SYSTEM**

Hüseyin EKİNCİ

Cumhuriyet University

Graduate School of Natural and Applied Sciences Department of Physics

August-2008

Supervisor: Prof. Dr. Sezai ELAGÖZ

In this work a detailed investigation of the MOCVD epitaxial single crystal growth system is aimed. It is well known that MOCVD systems are very important for nano structures growth, and Physics department of Cumhuriyet University has pioneered installing an MOCVD system. This particular system will be the second in Turkey (first if As/P growth is considered). The study of this system and the comparison of it with the other systems are important for especially young researchers who are willing to study in this area. After a general investigation of crystal growth system, we will investigate some nano-devices that are based on III-V's and discuss the future road map.

KEY WORDS: Single-Crystal Growth Techniques, LPE, VPE, CVD, MBE, MOCVD, III-V Group Semiconductor, III-N, LED, LD, PD.

TEŞEKKÜR

Tez konusunun saptanmasından sonuçlanmasına değin çok değerli bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım Prof. Dr. Sezai ELAGÖZ hocama kalbî duygularla teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, güven ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, dualarıyla hep yanımda olan pek kıymetli anneme ve babama, yanı sıra, bu tezin yazımında büyük emekleri olan sevgili kardeşlerim Eyüp ve Nurhan'a içten duygularıyla teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
1. YARIİLETKEN MALZEMELER VE DÜŞÜK BOYUTLU SİSTEMLER	1
1.1. Yarıiletken Malzemeler	1
1.2. Heteroyapılar	2
1.3. Düşük Boyutlu Yarıiletken Sistemleri	4
1.4. Bantlar Arası Geçiş	12
1.5. Yarıiletkenlerde Katkılama	14
1.6. p – n Ekleme	19
2. EPİTAKSİYEL BÜYÜTME TEKNİKLERİ	25
2.1. Giriş	25
2.2. Epitaksi	26

2.2.1. Homoepitaksi	27
2.2.2. Heteroepitaksi	27
2.3. Likit Faz Epitaksi (LPE)	32
2.4. Buhar Faz Epitaksi (VPE)	36
2.5. Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD)	40
2.6. Moleküler Demet Epitaksi (MBE)	44
3. METALORGANİK KİMYASAL BUHAR BİRİKTİRME (MOCVD)	53
3.1. Giriş	53
3.2. MOCVD Sistemi	58
3.2.1. Gaz-İşleme Sistemi	61
3.2.1.1. Bubbler ve Boru Sistemi	63
3.2.1.2. Hidrojen Saflaştırıcı	65
3.2.1.3. Termal Banyo	66
3.2.1.4. Elektronik Kütle-Akış Kontrolörleri	66
3.2.1.5. Manifold (Dağıtıcı)	68
3.2.2. Reaktör Odası	69
3.2.3. Hızlı Isıtma Teknikleri	75
3.2.4. Boşaltım Sistemi	78
3.2.4.1. Scrubber sistemi (atık temizleyici)	79
3.2.4.2. Yakmakutuları	80
3.2.4.3. Sızıntı detektörleri	80
3.3. MOCVD Büyütme Mekanizması	83
3.3.1. Termodinamik	85
3.3.2. Yüzey Kinetikleri	91

3.4. Akış Desenleri ve Reaktör Tasarımı	96
3.4.1. Laminer ve Türbülans Akış	97
3.4.2. Isı etkisi	101
3.4.3. Akış Deseni ve Reaktör Tasarımı için Modellemeler	103
3.4.4. Büyütme Kalitesini Artırma Girişimleri	106
3.5. III – V Grubu Önkaynaklar (<i>Precursors</i>)	108
3.5.1. III Grubu Önkaynaklar	114
3.5.2. V Grubu Önkaynaklar	118
4. III-V GRUBU YARIİLETKENLER	122
4.1. İkili (<i>Binary</i>) Yarıiletken Bileşikler	122
4.2. Üçlü (<i>Ternary</i>) Alaşımlar	124
4.3. Dörtlü (<i>Quaternary</i>) Alaşımlar	127
4.4. III-N'ler	129
4.4.1. Tarihçe	129
4.4.2. III – N'lerin Diğer Yarıiletken Ailelerine Göre Önemi	132
4.4.3. Temel özellikleri	135
4.4.4. III – N'lerde Polarizasyon (Kutuplanma)	138
4.4.5. Büyütme ve Altaşlar	142
4.4.6. Bazı Uygulama Alanları	145
5. MOCVD İLE BÜYÜTÜLEN III-V TABANLI YARIİLETKEN AYGITLAR	147
5.1. Elektronik Aygıtlar	147
5.1.1. Yüksek Elektron Mobiliteli Transistör (HEMT) Yapısı	149

5.2. Optoelektronik Aygıtlar	153
5.2.1. Işıık Yayan Diyotlar (LEDs)	155
5.2.1.1. LED'lerin spektral saflığı	158
5.2.1.2. Gelişmiş LED Tasarımları	159
5.2.2. Lazer Diyotlar (LDs)	165
5.2.2.1. Lasing için temel prensipler	166
5.2.2.2. Lazerde Eşik Değer	174
5.2.3. Fotodetektörler (PDs)	176
5.2.3.1. Optik soğurulma	176
5.2.3.2. p-n Diyotta Fotoakım	180
5.2.3.3. Fotoiletken dedektörler	182
5.2.3.4. p-i-n Fotodetektörler	183
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	186
KAYNAKÇA	192
ÖZGEÇMİŞ	201

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 Silisyumdaki katkılama seviyeleri.	18
Çizelge 2.1 Çeşitli CVD teknikleriyle büyütülen bazı yarıiletkenler malzemeler ve ilgili reaktantlar (Jackson, 1998) AP: atmosferik basınç, LP: düşük basınç, UHV: ultra yüksek vakum, MO: metalorganik, OM: organometalik.....	42
Çizelge 3.1 MOCVD tekniğiyle büyütülen bazı III-V bileşiklerinin büyütme sıcaklığı ve ilgili reaktantlar (Steiner, 2004).	75
Çizelge 3.2 Bazı reaksiyonların serbest enerji değişimleri (Steiner, 2004).	86
Çizelge 3.3 TMGa ve AsH ₃ kullanılarak GaAs büyütme sürecindeki, altaş yüzeyinde ve yüzey çevresinde oluşan reaksiyonlar ve gaz-faz reaksiyonları. S _A , S _G sırayla arsenik ve galyum alanlarını belirtir. (*) işareti de yüzey geribırakmasına temsil etmektedir (Jensen, 1991).	94
Çizelge 3.4 TMGa ve AsH ₃ kullanılarak GaAs büyütme sürecindeki, altaş yüzey reaksiyonları (Jensen, 1991).	95
Çizelge 3.5 MOCVD sisteminde yaygınca kullanılan III-V grubu önkaynaklar.	110
Çizelge 3.6 MOCVD sisteminde, n- ve p- tipi katkılama için kullanılan bazı önkaynaklar.	111
Çizelge 4.1 Bazı III-V yarıiletken bileşiklerin özellikleri (300 K'de). Burada m ₀ elektronun durgun kütlesi, m _e iletim bandının etkin kütlesi, m _{hh} ve m _{lh} ise sırayla ağır ve hafif değerlik bantlarına ait etkin kütlelerdir. D ve I bant geçiş tipinin sırayla direk ve indirek geçişli olduğunu göstermektedir. Bu bileşiklerin tümü çinko sülfür örgü yapısına sahiptir.	123
Çizelge 4.2 300 K'de, çeşitli III-V üçlü alaşımlarının enerji aralıklarının kompozisyonuna bağımlılığı (Casey ve Panish, 1978).	126
Çizelge 4.3 Çok tabakalı heteroyapılar için örgü-uyumlu III-V grubu bazı ikili ve dörtlü sistemler (Casey ve Panish, 1978). Burada ikili bileşikler altaş olarak kullanılarak bunların üzerine dörtlü alaşımlar büyütülür.	128
Çizelge 4.4 Bazı III-N yarıiletkenlerin fiziksel özellikleri (Morkoç, 1999; Meijers, 2007).....	136
Çizelge 4.5 III-N'lerde kullanılan bazı altaşlar (Cho, 2007).	144

ŞEKİLLER DİZİNİ

- Şekil 1.1** Farklı bant aralığına sahip olası heteroyapıların basitleştirilmiş potansiyel profilleri.....3
- Şekil 1.2** Düşük boyutlu yapılar. (a): malzemenin boyutları, (b): Fermi küreleri, (c) DOS. Burada CB: iletim bandı, VB: değerlik bandı, DOS: durum yoğunluğu, QWe: kuantum kuyusu, QWi: kuantum teli, QD: kuantum noktası.5
- Şekil 1.3** Bazı yarıiletkenlerdeki etkin kütlelerin bir fonksiyonu olarak de Broglie dalga boyları (Manasreh, 2005).....7
- Şekil 1.4** $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$ kuantum kuyusunun (a)'da konum grafiği; (b)'de potansiyel grafiği (elektronik bant yapısı). Burada elektronlar, sonlu bir kare kuyu potansiyeli ile GaAs tabakasında tuzaklanmaktadır. Bu yapı, x yönünde büyütülmüştür. Böyle bir yapıda taşıyıcılar büyütme doğrultusunda kuşatılıp diğer iki yönde serbestçe hareket ettikleri için ve bu yapıya “Kuantum Kuyusu” denir.....8
- Şekil 1.5** Bir kuantum kuyu yapısının iletim bandı içindeki bir elektronun enerjisindeki kesiklik (a), düzlemdeki enerji dispersiyonu (b) ve durum yoğunluğu DOS (c). c’de düz çizgiler kuantum kuyu, kesikli çizgiler külçe yapı içindir. Bir kuantum kuyusunda, sadece tek bir doğrultuda kuşatma olduğu için, taşıyıcıların enerjileri bir doğrultuda kuantize olurken diğer iki yönde serbesttir. Yani bu iki yöndeki dalga fonksiyonu, düzlem dalga ile tasvir edilir.....9
- Şekil 1.6** Tip I sınıfı (semer) heteroyapıların enerji-bant şemaları: (a) tek-heteroeklem arayüzeyi, (b) çift-heteroeklem kuyu, (c) engel, (d) çoklu-kuantum kuyu ve (e) süperörgü. Dikkat edilirse, iki yarıiletken tabakasına tek-heteroyapı, üçüncü bir tabaka eklenirse çift-heteroyapı denmektedir. Örneğin semer tipi bir çift-heteroyapı, $GaAs/AlGaAs/GaAs$ formunda bir engel olurken $AlGaAs/GaAs/AlGaAs$ formunda ise bir kuyu olmaktadır. Burada LW kuyu genişliği, LB ise bariyer genişliğini temsil etmektedir.....10
- Şekil 1.7** (a) Direkt (dolaysız) ve (b) indirekt (dolaylı) geçişlerin gösterimi. İndirekt geçişlerde momentum korunabilmesi için fonon momentumuna gerek duyulması bazı sıkıntıları beraberinde getirir. Bu açıdan özellikle optoelektronik teknolojilerinde direkt malzemeler tercih edilir.12
- Şekil 1.8** Γ , X ve L vadilerini gösteren bant şemaları (Singh, 2003). Soldaki GaAs sağdaki ise AlAs için bant diyagramıdır. Dikkat edilirse; $k = 0$ 'da, GaAs için iletim bandının en düşük vadisi Γ iken AlAs'de X olmuştur. İşte bu fark,

malzemenin bant tipini belirlemektedir. En düşük vadi Γ ise direkt (GaAs), değilse indirekt (AlAs) olmaktadır..... 13

Şekil 1.9 (a) Silisyumun son yörüngesindeki dört elektron da değerlik bandına gider. (b) Bu yapıya verici eklendiğinde, vericinin sahip olduğu beş değerlik elektronundan dördü yapının kovalent bağına katılır. (+) yüklü iyon haline gelen verici ile bir elektron arasında kulombik etkileşim kurulur. 15

Şekil 1.10 Silisyumu n-tipi katkılama. Enerji şemasında görüldüğü üzere, verici seviyesi iletim bandına çok yakındır. Diğer bir deyişle, küçük bir enerji ile vericiler iyonlaşarak iletim bandına fazladan elektron verir. (+) yüklü verici ile fazla elektron yükler arasında kulombik etkileşim kurulur. 16

Şekil 1.11 Silisyumu p-tipi katkılama. Enerji şemasında görüldüğü üzere, alıcı seviyesi değerlik bandına çok yakındır. Diğer bir deyişle, küçük bir enerji ile alıcılar değerlik bandından elektron alarak bu banttaki deşik konsantrasyonunu artmasına neden olur. (-) yüklü alıcı ile deşik arasında kulombik etkileşim kurulur. 17

Şekil 1.12 Üst kısımda ayrı ayrı p- ve n- tipi bölge ve bunların bant şemaları ifade edilmektedir. Orta kısımda bu bölgelerin bir araya gelmesiyle oluşan eklem ve bu eklem bant şeması verilmektedir. Dikkat edilirse, sistem dengeye geldiğinde eklem E_F seviyesi düzdür. 20

Şekil 1.13 Denge (a), düz beslemde (b) ve ters beslemde (c) p-n eklemi, potansiyel profilleri ve I-V eğrileri. Görüldüğü üzere, eklem potansiyeli ve tüketim bölgesi düz beslemde azalırken ters beslemde artmaktadır. Burada V_{bi} iç potansiyel, V_f düz beslem potansiyeli ve V_r de ters beslem potansiyelidir. 22

Şekil 1.14 Aşırı katkılanmış p-n eklemi. Herhangi bir besleme yokken, bile taşıyıcıların tünelleme olasılıkları yüksektir. 23

Şekil 2.1 Katı tipleri. a: amorf, b: polikristal, c: tek kristal..... 25

Şekil 2.2 Alttaş üzerine bir malzeme büyütülürken karşılaşılan durumların şeması. Soldan sağa doğru sırayla uyumlu (matched), gergin (strained) ve gevşek (relaxed) büyüme söz konusudur. Son iki durum başat olarak alttaş ile epitaksiyel tabakanın örgü parametrelerinin denk olmayışından kaynaklanmaktadır. Gevşek yapıda; ilkin yaklaşık tek-tabaka kalınlığında uygunsuz (misfit) dislokasyonlu bir tabakadan sonra biriktirilen malzeme kendi örgü parametresiyle büyür. Uygunsuz dislokasyonlar büyütülen tabakaların tek-kristal yönelimini ve yüzey elektronik özellikleri değiştirecektir. 28

Şekil 2.3 Bazı yarıiletken bileşiklerin örgü parametreleri, bant aralıkları ve bu aralıktan salınan ışığın dalga boyu (300 K). *İtalik* yazı bant tipinin indirekt

- olmasını ifade eder. WZ: wurtzite, ZB: çinko-sülfür, H: hekzagonal, C: kübik, D:elmas örgüyü temsil eder. Not: son zamanlarda rapor edilen bant aralığı $\sim 0,7$ olan yeni InN bileşiği * ile belirtilmiştir [(Takahashi K., Yoshikawa A. ve Sandhu A, 2007) ‘den sonra].....29
- Şekil 2.4** Genel olarak ince film büyütme teknikleri.31
- Şekil 2.5** Ga - As faz diyagramı (Fahrner, 2005).....33
- Şekil 2.6** LPE ile heteroyapılar büyütmek için geliştirilen kaydırma tekniğinin şeması. Üst platformundaki her bir kutunun içinde farklı kompozisyonlu eriyikler bulunmaktadır. Altta bulunan platform, kutuların altından kaydırılarak çoklu tabakalar büyütülür.35
- Şekil 2.7** Tipik bir VPE reaktörünün şeması.....37
- Şekil 2.8** Seçici epitaksiyel büyütmenin şeması. Yalıtkan şerit üzerinde herhangi bir büyüme olmaz iken alttaş üzerinde ilgili malzemenin tek kristali büyütülebilmektedir.....39
- Şekil 2.9** Tipik bir CVD reaktörünün şeması. Kontrollü miktarlardaki önkaynaklar reaktör odasına transfer edilir. Dış kangallarda RF gücü kullanarak reaktör içindeki tutmaç (susceptor) indükleme ile ısıtılır. Bu ısıyla önkaynakların piroliz (termal ayrışma) reaksiyonları sonucu alttaş üzerinde epitaksiyel tabakalar büyütülür.41
- Şekil 2.10** Yaygın olarak kullanılan bazı CVD reaktörlerinin şeması. Yatay reaktörde (a) alttaş açısı değiştirilmek suretiyle laminer akış en verimli bir şekilde kullanılır. Dikey (b,c) ve Barrel (d) tipi reaktörlerde, alttaşları üzerinde bulduran platform döndürülerek tekdüze büyütme sağlanır. Dikey reaktör aynı zamanda Pancake reaktör olarak da bilinir. Bu reaktörler yaklaşık olarak 1 Torr ile atmosferik basınç (760 Torr) aralığında işlem yapmaktadır. Ayrıca LPCVD reaktörlerde ise düşük basınçta çalışılarak gaz atomlarının ortalama serbest yolu artırılır. Bu reaktörlerde çeşitli ısıtma teknikleri kullanılabilir.43
- Şekil 2.11** Tipik bir MBE sisteminin şeması46
- Şekil 2.12** MBE’de epitaksiyel büyütme esnasında gerçekleşen yüzey kinetiklerinin şematik gösterimi. 1: tutunma (adsorpsiyon), 2: yüzeyde difüzyon, 3: örgüye katılma, 4: geri bırakma, 5: iç – difüzyon47
- Şekil 2.13** Çok küçük bir açıyla alttaş yüzeyine yönlendirilen elektron demetinin floresan ekrana yansıtılmasıyla RHEED paternlerinin elde edilmesi. θ açısı genellikle 1° ’den daha dardır (Steiner, 2004).49

Şekil 2.14 MBE’de tabaka tabaka büyüme modunun şeması (2 boyutlu büyüme). Büyütme süresince tek tabakanın oluşumu ve buna karşılık gelen RHEED titreşimleri. Burada Θ büyütülen tabakanın kaplanan kesrini temsil etmektedir.	51
Şekil 3.1 MOCVD ile safir alttaş üzerine AlN büyütmesinin yüksek çözünürlüklü TEM resmi. Bu yapının örgü uyumsuzluğu büyük olduğu için yaklaşık tek tabaka kalınlığında dislokasyonlu bir arayüzeyden sonra AlN tabakalarının kendi örgü parametresiyle büyüdüğü varsayılır (Steiner, 2004).	57
Şekil 3.2 Tipik bir MOCVD sistemin şeması	59
Şekil 3.3 Aixtron RF 200 MOCVD sistemi	60
Şekil 3.4 Tipik bir gaz-işleme sistemi	62
Şekil 3.5 Eldivenli kutu (<i>glove box</i>). Sistem açık havaya maruz bırakılmadan reaktör odasına giriş-çıkış işlemleri burada gerçekleştirilir.	63
Şekil 3.6 Dip – tüp girişi bulunduran, özel paslanmaz çelikten yapılan tipik bir önkaynak muhafaza kabı (<i>bubbler</i>). En sağdaki fotoğrafta görüldüğü üzere, faal bir sistemde kullanılan <i>bubbler</i> ’lar bir termal banyo içerisindedir. Bu banyo ile <i>bubbler</i> ’ın sıcaklığı hassas bir şekilde ayarlanır.	64
Şekil 3.7 Elektronik kütle-akış kontrolörü.	67
Şekil 3.8 Manifold sistemi. Gaz karışımı burada ayarlanarak reaktör odasına sevk edilir.	68
Şekil 3.9 AIX 200/4 RFS reaktör (Razeghi ve Henini, 2004).	70
Şekil 3.10 Yatay MOCVD reaktörünün üstten görünüşü.	71
Şekil 3.11 AIX 2600G3 HT	71
Şekil 3.12 Dönen disk (<i>rotating disk</i>) reaktöründeki akış çizgilerinin şeması (Razeghi ve Henini, 2004).	72
Şekil 3.13 Close-coupled showerhead reaktörünün şeması	73
Şekil 3.14 Close-coupled showerhead reaktörü	74
Şekil 3.15 RF indüksiyon ısıtma. Bu tarz ısıtmada, sisteme dışarıdan indüklemeye yoluyla ısı verildiği için sistem açık havaya maruz bırakılmaz.	76
Şekil 3.16 Radyatif ısıtma sisteminin şeması	77

- Şekil 3.17** Scrubber sistemi. Tehlikeli gazları yasal olarak belirlenen “güvenli konsantrasyon” sınırlarına kadar seyrelterek, etkisiz hale getirir.....79
- Şekil 3.18** Yakma-kutusu. Tehlikeli gazları fırınlayarak etkisiz hale getirir.81
- Şekil 3.19** MOCVD tekniğine ilişkin temel süreçler (Stringfellow, 1985).....84
- Şekil 3.20** Herhangi bir faz diyagramının oluşturulmasına ilişkin parametreler (Razeghi, 1995)90
- Şekil 3.21** GaAs büyütme sürecine ilişkin adımların basitleştirilmiş bir şekli.92
- Şekil 3.22** Olası akış desenlerinin şeması. (a): z mesafesini kat ettikten sonra akış hızı parabolik bir görünüm alır, (b): Akış türbülans olduğunda, hem zamansal hem de uzamsal olarak ani ve düzensiz hız dalgalanmaları aşırı derecede gelişir. Laminer akış düzeni, akış yoluna büyük bir açıyla konulan bir engelle (c) ve (d) veya tüp çapı değiştirilmek suretiyle (e) ve (f) kolaylıkla bozulabilir. (c) ve (d)'de tutmaç açısının akış üzerindeki etkisi temsil edilmektedir. (e) ve (f)'de borunun genişleme oranı basınçta bir azalmaya neden olacaktır ve bu durum ister istemez akışın düzgün veya türbülanslı olmasını belirleyecektir. Genel olarak, genişleme açısı kritik değerden ($\sim 7^\circ$) daha büyük değer alırsa laminer akıştan türbülans akışa geçmeler oluşur.100
- Şekil 3.23** Yatay bir reaktördeki bir gaz akış gösterimi.....101
- Şekil 4.1** Çinko sülfür (*zinc-blende*) kristal yapısı. Aslında bu yapı, iki farklı tür element barındıran ve ilk element için birinci fcc kafesinin (mavi renkte olan) cisim köşegenden çeyrek uzaklıktan ($1/4, 1/4, 1/4$) itibaren diğer element için ikinci fcc kafesinin (kırmızı renkte olan) yer almasıyla oluşur. Siyah çizgilerle gösterildiği gibi bir türün her atomu en yakın dört tane diğer tür atomla tetrahedral bağ yapar.122
- Şekil 4.2** (a) 300 K'de, $Ga_{1-x}Al_xAs$ yapısında, kompozisyonun bir fonksiyonu olarak iletim bandı vadilerinin değişimi. Burada Γ vadisi direkt, L ve X vadileri indirektir. Dikkat edilirse, ilkin iletim bandının çukuru Γ vadisi iken takriben $x=0.4$ değerinden sonra artık iletim bandının çukuru X vadisi olmaktadır. (b) Alaşımın kırılma indisi.....125
- Şekil 4.3** Yıllara göre GaN ile ilgili yayınların dağılımı. Kaynak: INSPEC, Keyword=GaN.130
- Şekil 4.4** III-V grubu yarıiletken aileleri.134
- Şekil 4.5** Hekzagonal GaN ile ilgili polar ve non-polar kristal düzlemleri ve yönleri. Altıgen prizmanın taban kenar uzunluğu a, yüksekliği c parametresi ile

- tanımlanır (mavi çizgiler). Böyle bir yapıdaki her bir grup-III atomu dört tane N atomuyla tetrahedral bağ yapar (kırmızı çizgiler). 137
- Şekil 4.6** GaN bileşiğinde Ga-yüzlü ve N-yüzlü polarite (Meijers, 2007). 139
- Şekil 4.7** Ga-yüzlü (a) ve N-yüzlü (b) GaN/AlGaN/GaN heteroyapı da kendiliğinden ve piezoelektrik polarizasyon. Farklı yüzlerde büyütülen yapılarda zıt etkilerin olduğu görülmektedir. Bu zıt etkiden dolayı 2DEG oluşumunun konumu değişmektedir. 140
- Şekil 4.8** Polarizasyon varlığında, polar c-düzlemi GaN/AlGaN SQW bant şeması (a), ve polarizasyon yokluğunda, m- veya a-düzlemi bant şeması (b)'nin karşılaştırılması. Dikkat edilirse, polarizasyondan ötürü E_g 'de ve dalga fonksiyonunun biçiminde bozulma olur (Waltereit ve ark, 2000). 141
- Şekil 4.9** III-N'lerde sıklıkla rastlanan dislokasyonlar. (a) Safır/GaN kesit alanı TEM görüntüsü. Bu resimdeki çizgiler kenar tipi dislokasyonlardır. (b) Safır alttaş üzerine büyütülen GaN'ın AFM yüzey görüntüsündeki vida tipi dislokasyonlar (Çörekçi, 2008). 142
- Şekil 4.10** Dalgaboyu spektrumundaki AlN, GaN ve InN yarıiletkenleri. 145
- Şekil 5.1** Bazı elektronik aygıtlar 148
- Şekil 5.2** $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ heteroyapı oluşturulmadan öncesi (a) ve sonrası (b). İlkin (a) elektronlar yerlerinde iken sistem yüksüzdür, tabakalar birleştirildiğinde (b), elektronlar termal enerjileri nedeniyle hareket ederek GaAs tarafına geçerler. Sistem termodinamiksel dengeye ulaştığında, GaAs tarafına geçen elektronlar tekrar dönemeyip, burada oluşan üçgensel bir potansiyel kuyuda tuzaklanarak 2DEG oluşur. 150
- Şekil 5.3** AlGaN/GaN HEMT'in şeması (Bernát, 2005). Burada S: kaynak, G: kapı, D: akaç elektrotudur. Bu yapıda AlGaN ve GaN arasındaki polarizasyon farkı, bariyer yüzeyindeki negatif yüke uygun olarak arayüzeyde pozitif yük indüklenmesine yol açar. Arayüzeyin diğer tarafında bu (+) yük, üçgenimsi potansiyel bir kuyuda elektronların birikmesine, yani 2DEG oluşmasına yol açar. Kapı voltajı sayesinde üçgensel potansiyel kuyudaki birikim yükseltilir veya daha da düşürülür. Bu şekilde 2DEG yoğunluğu değiştirilerek akaç-kaynak akımı anahtarlanır 151
- Şekil 5.4** Optoelektronik aygıtlar 153
- Şekil 5.5** Düz beslem altındaki bir p-n eklemi. Eklemin n-bölgesi cihaza gömülme suretiyle buraya enjekte edilen deşiklerin oluşturacağı fotonlar LED' in yüzeyinden çıkmazlar. Cihazın üst kısmında yer alan p-bölgesine enjekte edilen

elektron yüzeye daha yakın yerde foton üreteceği için yüzeyden salınma imkânı çok daha fazladır. Enjekte edilen elektronlar ve deşikler quasi Fermi dağılım fonksiyonuyla tasvir edildiğinden aygıttan yayılan ışın, yarıiletken malzemenin bant aralığına çok yakındır. Öyleyse, arzulanan ışığı elde etmek için farklı bant aralığına sahip malzemeler kullanılabilir. 156

Şekil 5.6 Bir LED'de, elektronlar ve deşikler kBT 'lik enerji genişliğini kaplayacak şekilde dağılırlar (Oda sıcaklığında $kBT \sim 25$ meV). Bu skaladaki tüm elektron-deşik çiftleri optik çıkışa katkı sağladığı için doğal olarak LED çıkışı kabaca kBT 'lik bir genişlikte olacaktır. Bu genişlik insan gözünün fark edemeyeceği bir değerde olduğu için görüntüleme sistemlerinde LED'lerin kullanılmasını sağlamıştır. Fakat yüksek modülasyonlu cihazlarda bu genişlik problem oluşturacağından bu tür cihazlarda LED'lerin kullanımı pek tercih edilmez. Burada I_{ph} saniye başına üretilen foton sayısıdır. 159

Şekil 5.7 (a) Tipik bir heteroeklem LED şeması, (b) düz beslem altında şeması, (c) kırılma indisi. Nispeten daha geniş bant aralıklı bir malzeme (burada AlGaIn), daha dar aralıklı bir malzemeyi (burada GaN) çevreler. Burada, geniş aralıklı n ve p bölgelerindeki elektronlar ve deşikler kontrollü bir şekilde dar aralıklı aktif bölgeye enjekte edilir. Dikkat edilirse, bu elektronlar aktif bölgenin ötesindeki geniş aralıklı p bölgesine geçmesi oldukça zor olduğu için daha önce değindiğimiz kötü yüzey şartlarından etkilenmeyecektir. 160

Şekil 5.8 Kenardan yayımlı LED'in şeması. Bu yapıdaki, aktif bölge i - $In_{0,47}Ga_{0,53}As$ (0,8 eV), kılıf katmanlar (cladding layer) ise sırayla p^+ -InGaAsP ve n^+ -InGaAsP (~ 1 eV) tabakalarıdır. Bu tabakalarla ışığın sadece aygıtın kenarlardan yayılması sağlanır. En uç p^+ -InP ve n^+ -InP (1,35 eV) katmanları ise ışığın daha iyi sınırlandırılmasını sağlamaktadır. Dikkat edilirse, aktif bölge diğerlerine nazaran oldukça incedir. Metal şerit (mavi renk) dar yapılarak, aktif bölgeden yayılan ışığın sadece küçük bir alandan çıkması sağlanır (sarı renkli alan). SiO_2 (noktalı bölge) işte bu şeridin dar olması için kullanılır. 162

Şekil 5.9 Yüzeyden yayımlı bir LED'in şeması. Epoksi reçinesi ile fiber, LED'e monte edilir. Bu yapıda, aktif tabakada üretilen ışık doğrudan fibere yönlendirilir. Bu türün gelişmiş versiyonlarında mikrolensler kullanılarak kuplaj verimi iyileştirilir. Burada SiO_2 (noktalı alan) yalıtıcı görevinde olup metal kontağın küçük bir kesimi yapıya temas ettirilir. Isı alıcı (çizgili alan) olarak genellikle altın veya bakır bir plaka kullanılır. Isı alıcı, hem fazlasıyla ısınan sistemi soğutmak için hem de alt taraftan çıkan fotonları engellemek için kullanılır. 163

Şekil 5.10 Bir elektromanyetik dalga ile etkileşen atomdaki temel etkileşim süreçleri. Atom üzerine ışık düşürüldüğünde, atom uygun hf enerjili foton bir foton soğurarak uyarılır. Böyle bir durum "uyarılmış soğurma süreci" olarak bilinir

- (a). Uyarılmış durumdaki bir atom foton salarak karar olmak, yani taban duruma düşmek ister. Foton yaymak için elektron ve deşik yeniden-birleşir ki bu süreç kendiliğinden yaymadır (b). LED'lerin işleminde bu süreç geçerlidir. (c) şıkkında kendiliğinden yayma sürecine ek olarak uyarılmış yayma vardır. Burada yayılan fotonlar gelen foton ile aynı fazdadır. Yani yayılan fotonlar gelen fotonla aynı enerji ve dalga vektörüne sahiptir. LD'lerin işleminde ise bu süreç geçerlidir. 167
- Şekil 5.11** Atomların Boltzmann Dağılımı. Dikkat edilirse dengede iken oldukça çok miktardaki atom en düşük enerji seviyesindedir (üst şekil). Sistem pompalandığında, uyarılmış bir durumdaki atom sayısı taban durumundakinden daha fazla olacak şekilde tersine çevrilebilir ki bu eylem nüfus terslenmesi olarak bilinir. 170
- Şekil 5.12** Fotonları hapsedmek için oyuk ve aynaların kullanıldığı tipik bir lazer yapısı (Singh, 2003)'den sonra. Ortada, oyuğun kararlı durumları gösterilmektedir. Üç tane boyuna optiksel mod gösterilmektedir. Bu rezonant durumlar aynalar vasıtasıyla gerçekleştirilir. Altta gösterildiği gibi optiksel hapsedme, dielektrik sabitindeki değişim ile sağlanır. Böyle bir yapı Fabry-Perot oyuğu olarak bilinir. 173
- Şekil 5.13** Bir yarıiletken lazerde enjeksiyon akımının fonksiyonu olarak lazerleme modlarındaki ışık çıkışı. Eşik değerinin üzerine çıkıldığında, yüksek foton yoğunluğu uyarılmış yayma sürecinin baskın olmasına yol açtığından ışık çıkışı çok ani bir şekilde değişiklik göstermektedir. Burada J_{th} akım yoğunluğunu ifade etmektedir. 174
- Şekil 5.14** (a) Eşik değerinin altında lazer. Kazanç, oyuktaki kayıptan çok daha azdır ve ışık emisyonu tıpkı LED'lerdeki gibi oldukça geniştir. Başka bir deyişle, ışık çıkışında koherentlik yoktur. (b) Eşikte lazer. Bu durumda, oyuktaki foton sayısı artmaya başlar. Işık emisyonunda birkaç tane mod, artık baskın olmaya başlar. (c) Eşik değerinin üzerinde lazer. Bu değerde ise kazanç spektrumu değişmez, ama uyarılmış yaymadan dolayı baskın bir mod ön plana çıkar. Burada n_{th} eşik taşıyıcı yoğunluğu ve J_{th} eşik akım yoğunluğudur. Örneğin; 300 K'de aktif tabakasının kalınlığı $2 \mu m$ olan bir çift heteroyapı GaAs lazeri için $n_{th} = 1.32 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $J_{th} = 1.76 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ değerindedir (Singh, 2003). 175
- Şekil 5.15** İnsan gözünün cevap-verme/duyarlılığı (*response*) ile bazı yarıiletkenlerin kesilme dalga boyu bulunmaktadır. (Singh, 1995). 177
- Şekil 5.16** Bazı yarıiletkenlerin soğurma katsayıları (Singh, 2003). 178
- Şekil 5.17** Güneş enerjisinin ışının spektrumu (Singh, 1995). 181
- Şekil 5.18** Tipik bir p-i-n dedektörünün şeması. 184

Şekil 6.1 LED'lerle beyaz ışık elde edilmesinin bir yolu.	189
Şekil 6.2 III – N'lerin bazı uygulama alanları.....	190

1. YARIİLETKEN MALZEMELER VE DÜŞÜK BOYUTLU SİSTEMLER

1.1. Yarıiletken Malzemeler

İki veya daha fazla başlangıç materyalinin '*katı çözelti*'sini yani alaşımını oluşturmak suretiyle yarıiletken bileşikler elde edilebilir. Bunun için, kristal yapıda herhangi bir bozulma olmayacak şekilde materyalin belirli bir bileşeninin yerine farklı bir atomun geçmesiyle bu eriyikler oluşturulur. Böyle bir katı çözelti oluştururken dikkat edilmesi gereken şartlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- ✓ Periyodik tabloda aynı grupta olmalı
- ✓ Aynı kristal yapısına sahip olmalı
- ✓ Büyük çarpıklıklara izin vermemek için yer değiştiren atomların çapları arasında büyük farklar olmamalıdır

İkili alaşımlara ek olarak üçlü ve dörtlü alaşımlarda mevcuttur. Örneğin üçlü $Al_xGa_{1-x}As$ alaşımını ele alalım. AlAs ve GaAs aynı kristal yapısına sahip olduğu için ve hem Al hem de Ga III grubu elementi olduğu için kristal yapı bozulmadan alüminyum GaAs içine karışarak katı çözelti oluşturabilir. Bu işlem sırasında, kristal örgünün Ga atomlarını bulunduran site üzerindeki Ga atomlarıyla Al atomları yer değiştirirken As atomlarını bulunduran sitede herhangi bir değişme oluşmaz. Bu şekilde AlAs ve GaAs ikili alaşımlarından üçlü AlGaAs alaşımı üretilir. Kristal örgünün her iki sitesinde de aynı anda değişmesiyle dörtlü alaşımlar oluşturulabilir. Örneğin ikili GaAs, InP, InAs, GaP bileşikleriyle $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ dörtlü alaşımı üretilir. Bu şekilde üçlü ve dörtlü alaşımlar oluşturmak suretiyle ve de bu alaşımların kompozisyonunda (eklenen atomun mol kesrinde) değişimler yapmak suretiyle daha esnek, yeni nesil malzemelerin geliştirilmesi olasıdır.

1.2. Heteroyapılar

Farklı türden iki ya da daha fazla yarıiletken malzemenin oluşturduğu sisteme “heteroyapı” denilir. Bu tür yapılar üretmek için MOCVD, MBE gibi epitaksiyel büyütme teknikleri geliştirilmiştir. Malzemenin kompozisyonunu değiştirmek suretiyle enerji aralığı (E_g) ve kırılma indisi (n) istenilen değerlere getirilebilir. Bu şekilde sistemin kompozisyonuna müdahale ederek aygıt-çıkış verimini artırmak mümkündür. Örgü parametresi sabit tutularak muhtelif E_g ve n değerlerine sahip yarıiletken malzemeleri tabaka tabaka bir araya getirilmesiyle heteroyapılar üretilir.

Lazer diyotlar, LED’ler, detektörler, FET’ler (alan etkili transistörler), foto-transistörler ve dalga-kılavuzlar (*waveguides*) gibi birçok elektronik ve optoelektronik aygıtın temelinde heteroyapılar yatmaktadır. Aygıt yapımında, aşağıdaki gibi özetleyeceğimiz açılardan heteroyapılar büyük önem taşımaktadır.

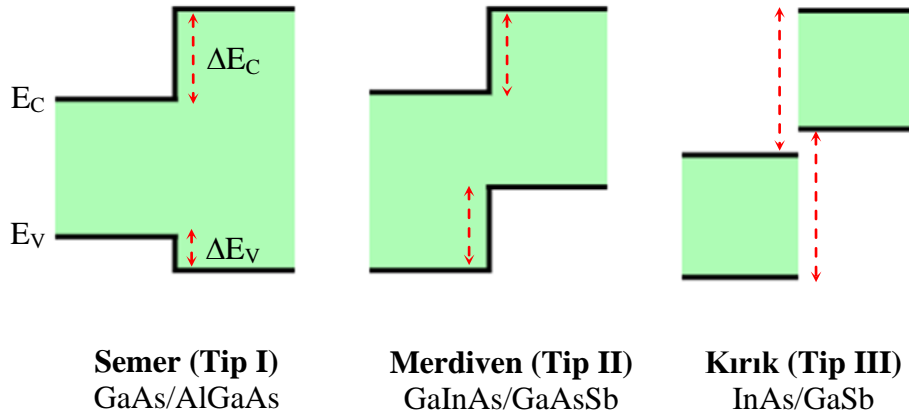
- ✓ Farklı E_g değerlerine sahip materyalleri kullanarak bir aygıttaki elektronları ve deşikleri daha iyi kontrol edilebilmek.
- ✓ Farklı kırılma indislerine sahip materyallerle dalga-kılavuzu ve yansıtıcı (*mirror structures*) yapıları üretebilmek. Bu şekilde, sadece arzulanan dalga boyunu yayan veya soğuran veya geçiren (*transparent*) yapılar gerçekleştirmek mümkündür.

Heteroyapılar oluşturulurken temel olarak, birleştirilen malzemelerin aynı kristal yapıya sahip olmaları, örgü sabitlerinin ve termal genleşme katsayılarının kıyaslanabilir olması gerekmektedir. Aksi takdirde; tabaklar arasındaki arayüzeyin dislokasyonlu olması kaçınılmazdır. Böyle bir kristal kusuru yapının kalitesini bozacaktır.

Heteroyapılarda bazı kabuller yapılmaktadır. Örneğin; heteroyapıyı oluşturan her bir bileşiğe ait taşıyıcının (elektron ya da deşik) kütlesi yerine bant teorisinin öngördüğü etkin kütleler alınır. Bileşikten bileşiğe etkin kütle m^* genel olarak

değişmesine karşın, çoğu durumda uygun bir yaklaşım yapılarak bu etki ihmal edilebilir. Diğer bir basitleştirme, heteroyapılardaki potansiyel profilinin keskin bir şekilde değiştiği (sharp interface) yani basamak fonksiyonu formunda olduğu kabul edilebilir. Bu yaklaşımlar kullanılarak sisteme ait Schrödinger denklemi çözülebilir.

Örgü sabitlerinin heteroyapı oluşturulurken dikkat edilmesi gereken önemli bir parametre olduğu daha önceden belirtilmişti (Bazı yarıiletkenlerin örgü sabitleri ve bant aralıkları 4. Bölüm'de sunulmaktadır). Nitekim $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}/\text{GaAs}$ yapısının popülerliğinin bir nedeni de yapıyı oluşturan AlAs ve GaAs bileşiklerinin örgü sabitleri arasındaki farkın çok küçük olmasıdır ($\sim 0.01\text{\AA}^0$). Şekil 1.1'de farklı bant aralığına sahip, olası heteroyapıların potansiyel şemaları bulunmaktadır (Kroemer, 1963)



Şekil 1.1 Farklı bant aralığına sahip olası heteroyapıların basitleştirilmiş potansiyel profilleri.

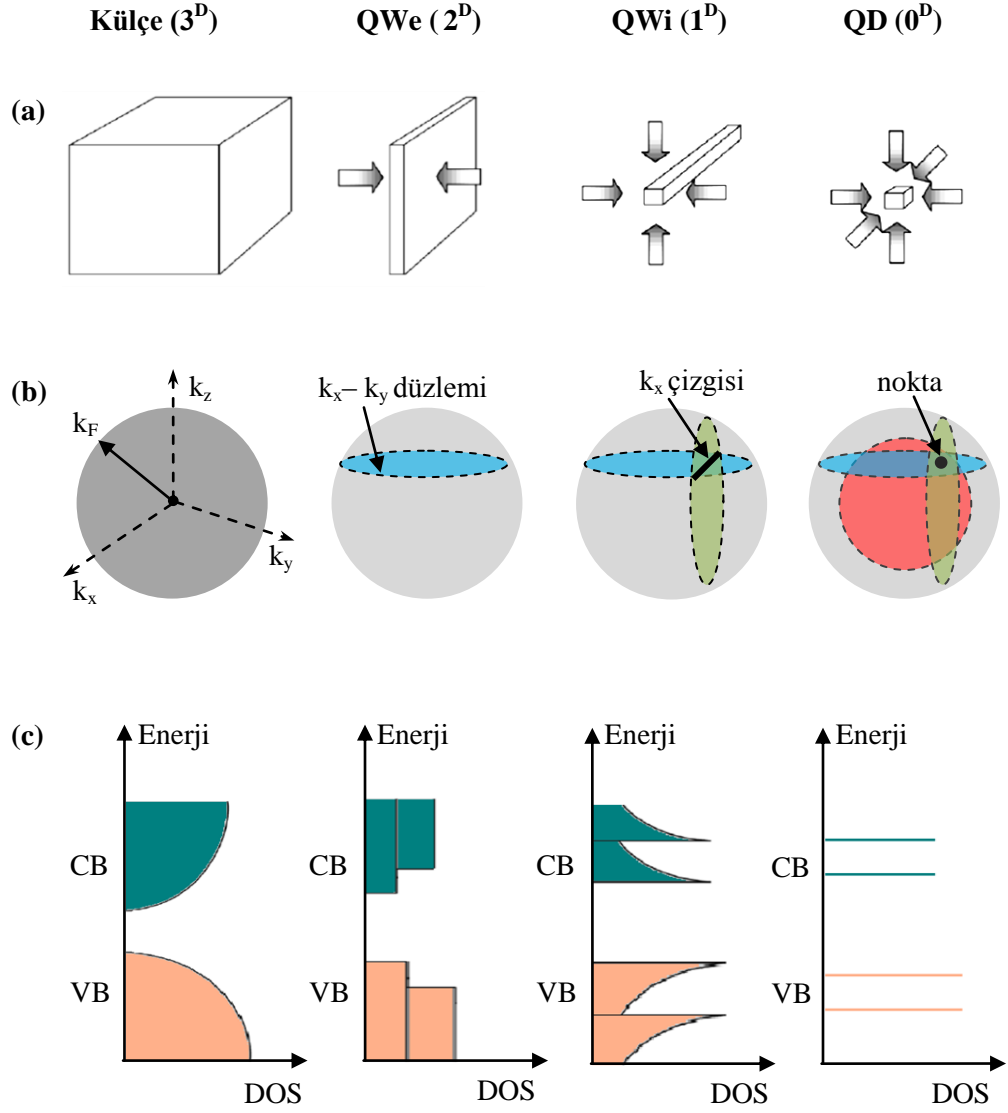
1.3. Düşük Boyutlu Yarıiletken Sistemleri

MOCVD (Metalorganik Kimyasal Buhar Biriktirme) ve MBE (Moleküler Demet Epitaksi) gibi epitaksiyel büyütme tekniklerinden yararlanarak, farklı bant aralığına sahip olan yarıiletkenlerin atomik mertebelerde birbiri ardına büyütülmesiyle düşük boyutlu yapılar (LDS) üretilir. Bunlara nano-yapılar da denilmektedir. Taşıyıcıların yaşam sürelerini artırma, dar ve iyi tanımlanmış enerji düzeyleri oluşturma ve benzeri açılardan düşük boyutlu yapıların külçe yapılara göre birçok üstünlüğü bulunmaktadır. Yoğun madde fiziği araştırmalarında ve modern aygıt teknolojisinde, LDS'lerin hatırı sayılır bir yeri vardır.

Düşük boyutlu sistemlerde yük taşıyıcılarının hareketleri, uzamsal olarak sınırlandırılır. Bu şekilde, külçenin sürekli olan enerji durumları, kuantum etkileri sonucu kesikli enerji seviyelerine dönüşür. Düşük boyutlu yapılarda, fiziksel parametreleri (kuyu genişliği, bariyer yüksekliği vb.) ayarlayarak yapının elektriksel ve optik özelliklerini daha belirgin kılmak mümkündür.

Yarıiletkenlerde taşıyıcıların hareket ettiği boyut azaltılırsa yük taşıyıcıların uzayın farklı bölgesinde lokalize olması sağlanır. Düşük boyutlu sistemlerde, boyut azaldıkça taşıyıcıların yaşam süreleri artar. Bunun başat nedeni, boyut azaldıkça taşıyıcıların saçılmaya uğrama olasılıklarının azalmasıdır. Boyut düştükçe taşıyıcıların yaşam süreleri ortalama olarak 1-2 ps'den 100 ps mertebesine çıkabilmektedir. LDS'deki düşük (*low*) kelimesini Razeghi iki ayrı bağlamda kullanmıştır.

- 1) 'low' ifadesi burada daha az boyutlu anlamındadır ve üç boyutlu yapılardan daha düşük boyutları (2^D , 1^D ve 0^D) kastetmektedir (Şekil 1.2).
- 2) 'low' kelimesi burada küçük anlamındadır ve genellikle nanoyapılar kastedilmektedir.



Şekil 1.2 Düşük boyutlu yapılar. (a): malzemenin boyutları, (b): Fermi küreleri, (c) DOS. Burada CB: iletim bandı, VB: değerlik bandı, DOS: durum yoğunluğu, QWe: kuantum kuyusu, QWi: kuantum teli, QD: kuantum noktası.

Nanoyapılar ile kasıt, malzeme öylesine küçük boyuttadır ki, boyutları öz-
taşıyıcılarının dalga boyuyla kıyaslanabilir. Bu kalınlık, taşıyıcıların ortalama serbest
yolundan daha küçük olduğu için böyle bir yapıda hareket eden elektronların

çarpışma yapmaları artık beklenemez. Buradaki dalga boyu de Broglie tarafından verilen bağıntıyla belirlenir.

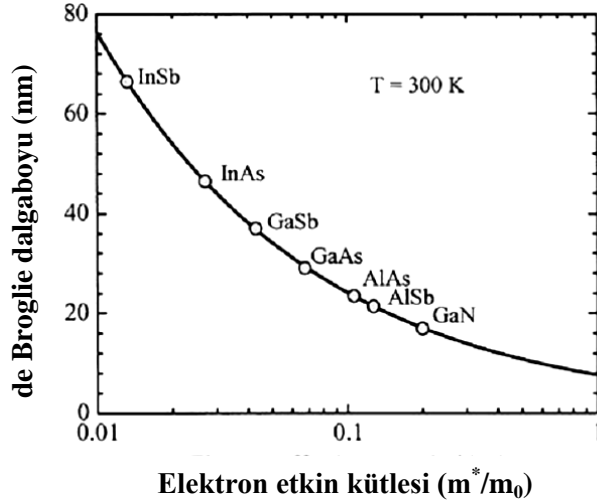
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2 m^* E}} = \lambda_0 \sqrt{\frac{m_0}{m^*}} \quad (1.1)$$

Burada h Planck sabiti, p taşıyıcının momentumu, λ_0 serbest elektronun de Broglie dalgaboyu, m^* yarıiletkende elektron etkin kütesidir. Örneğin, oda sıcaklığında, bir serbest elektronun de Broglie dalga boyu takriben 76 \AA iken GaAs içinde bu değer 295 \AA 'dür. Formüldeki m^* etkin kütle olarak adlandırılır ve elektronun serbest uzayda değil de ilgili malzemenin içinde hareket ediyor olmasından kaynaklanır. Etkin kütle aslında kristal potansiyel şiddetinin bir ölçütüdür ve malzemenin malzemeye değişir. Örneğin, m_0 serbest elektronun kütlesi olmak üzere GaAs için elektronun etkin kütle değeri $0.067m_0$ iken bu değer AlAs bileşiği içinde $0.110m_0$ 'dır. Başka bir değişle malzemenin malzemeye etkin kütle değiştiği için doğal olarak de Broglie dalga boyu da değişir. Bununla birlikte bu değişim fazla olmayıp birkaç yüz angström (10^{-10} m) mertebesindedir. Şekil 1.3'de elektronun etkin kütesinin bir fonksiyonu olarak bazı yarıiletkenlerin de Broglie dalgaboyları verilmiştir.

Düşük boyutlara (de Broglie dalga boyu veya daha küçük mertebelere) inildiğinde kuantum boyut etkilerinin (QSE) görülmesi, artık kaçınılmaz olur. Klasik fizik kurallarıyla bu durumu açıklamak mümkün değildir. Bu yeni yapının fiziği ancak kuantum mekaniği ile anlaşılabilir. Külçe içerisinde sadece taşıyıcı rolünü alan elektronlar bu boyutlara inildiğinde daha farklı özellikler kazanır. Nano-yapılarda durum yoğunluğu (DOS)*, ilgili yapının boyut düzeyine kuvvetlice bağlıdır. Aynı zamanda bir yarıiletkenin elektronik ve optik özellikleri de DOS'a kuvvetlice bağlıdır. Üç boyutta bir bandı karakterize etmek için k_x , k_y , k_z olmak üzere üç tane

* DOS (Density of States) durum yoğunluğu E enerjisi civarında, birim enerji başına ne kadar kuantum durumu düştüğünü belirten bir ölçüttür.

dalga vektörü yeterli iken bu sayı, boyutun azalmasıyla azalacaktır. Malzemenin üç boyutlu (3^D) yani külçe formunun DOS'u \sqrt{E} orantılı iken, iki boyutlu (2^D) yani kuyu formunun DOS'u sabit, bir boyutlu (1^D) yani tel formunun DOS'u $1/\sqrt{E}$, sıfır boyutlu (0^D) yani nokta formunun DOS'u $\delta(E)$ (Dirac delta fonksiyonu) olmaktadır. Kuantum etkileri taşıyıcıların davranışını değiştirdiği için bu malzemelerin elektronik ve optik özelliklerinin de değişmesi doğaldır. Yani belirli özelliklere sahip materyalin elektronik ve optik özellikleri, sistemin boyutları küçültülerek değiştirilebilir, yeni özellikler kazandırılabilir.



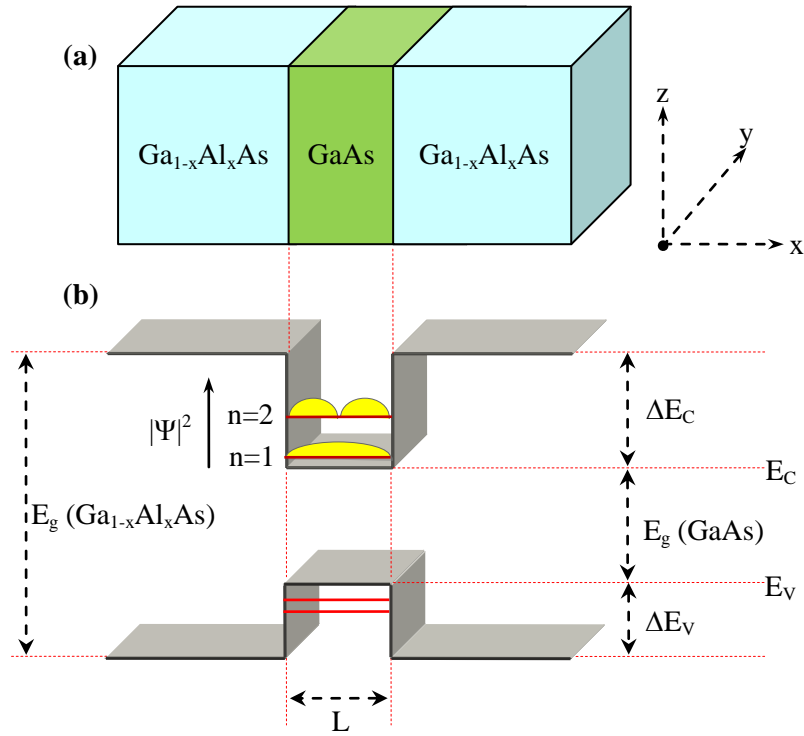
Şekil 1.3 Bazı yarıiletkenlerdeki etkin kütlelerin bir fonksiyonu olarak de Broglie dalga boyları (Manasreh, 2005).

Peki, ne kadar daha küçük olabilir? sorusunun cevabı “ilgili kristalinin makroskobik özelliklerini gösterecek bir kalınlıkta olmalı” şeklindedir. Bu kalınlık, en az üç tabaka alınmasını gerektirdiğinden kuyu genişliğinin alt sınırı takriben 20 Å’dür.

Yoğun madde fiziğindeki araştırmaların düşük boyutlu sistemler üzerinde yoğunlaşması şaşırtıcı değildir. Zira birçok elektronik ve optoelektronik aygıtın

temelinde bu yapılar yatmaktadır. Bu sistemlerde elektronik özellikler oldukça değişmektedir, bu değişimin temelinde ise DOS'un özgülük derecelerine bağlılığı yatmaktadır

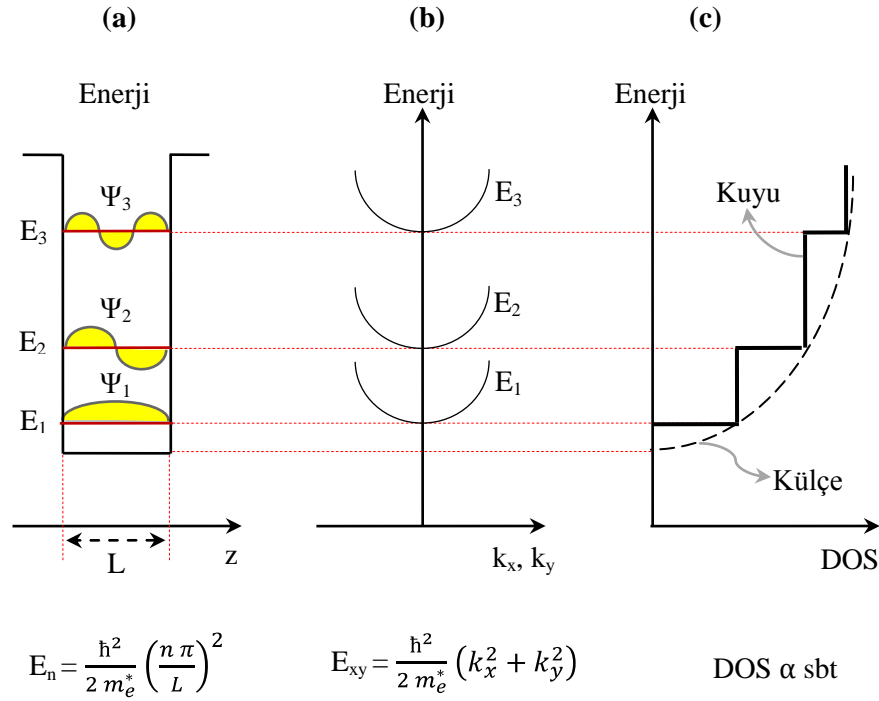
Çevre boyutları kısıtlanmamış bir malzemenin taşıyıcıları (elektron, deşik) üç yönde de hareket edebilme imkânına sahiptir. Durum böyle olmakla birlikte, taşıyıcıların hareket doğrultularının bir, iki ve üç boyutta kısıtlanmaları suretiyle sırayla kuantum kuyuları (QWe), telleri (QWi) ve noktaları (QD) oluşturulur. Epitaksiyel kristal büyütme tekniklerindeki gelişmeler, artık bu yapıların yüksek kalitede üretilmesi mümkün kılmıştır.



Şekil 1.4 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}/\text{GaAs}/\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ kuantum kuyusunun (a)'da konum grafiği; (b)'de potansiyel grafiği (elektronik bant yapısı). Burada elektronlar, sonlu bir kare kuyu potansiyeli ile GaAs tabakasında tuzaklanmaktadır. Bu yapı, x yönünde büyütülmüştür. Böyle bir yapıda taşıyıcılar büyütme doğrultusunda kuşatılıp diğer iki yönde serbestçe hareket ettikleri için ve bu yapıya “Kuantum Kuyusu” denir.

a) Kuantum kuyuları (QWe):

Külçenin sahip olduğu üç boyutlu hareket serbestliğinin iki boyuta düşürülmesiyle iki boyutlu yapılar yani kuantum kuyuları (QWe) elde edilir (Şekil 1.4). Aynı zamanda, bu yapılar taşıyıcının tipini de belirterek iki boyutlu elektron gazı (2DEG) ve iki boyutlu deşik (hole) gazı (2DHG) şeklinde de anılmaktadır.

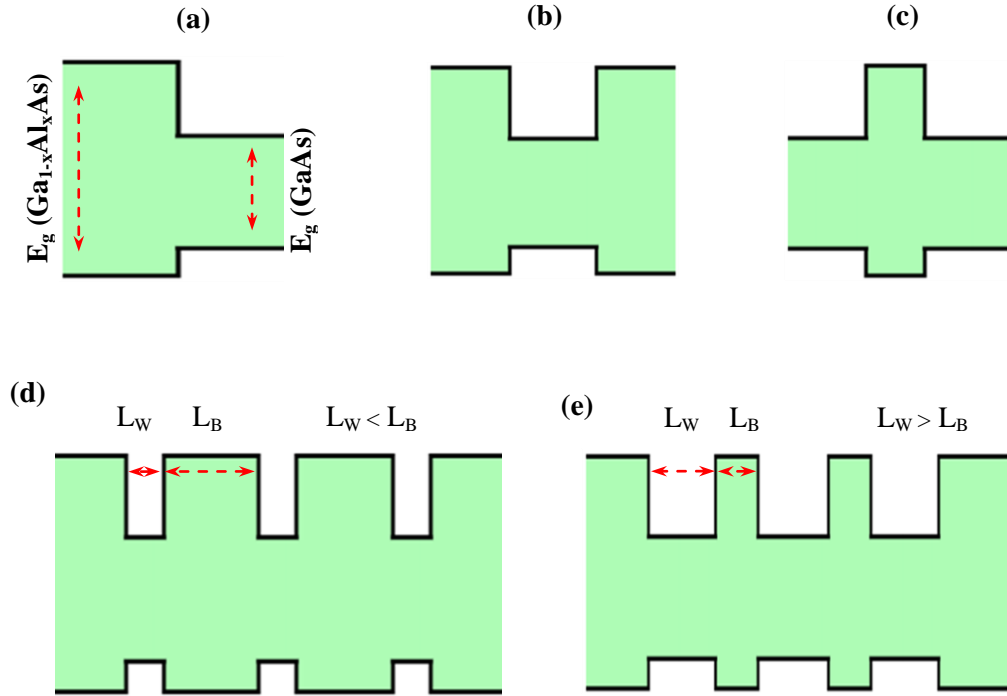


Şekil 1.5 Bir kuantum kuyu yapısının iletim bandı içindeki bir elektronun enerjisindeki kesiklik (a), düzlemdeki enerji dispersiyonu (b) ve durum yoğunluğu DOS (c). c'de düz çizgiler kuantum kuyu, kesikli çizgiler külçe yapı içindir. Bir kuantum kuyusunda, sadece tek bir doğrultuda kuşatma olduğu için, taşıyıcıların enerjileri bir doğrultuda kuantize olurken diğer iki yönde serbesttir. Yani bu iki yöndeki dalga fonksiyonu, düzlem dalga ile tasvir edilir.

Yasak bant aralığı nispeten düşük bir malzemenin yasak bant aralığı nispeten daha büyük farklı bir malzeme tarafından bir boyutta kuşatılmasıyla kuantum kuyuları üretilir. Şekil 1.5'de görüldüğü üzere, bu yapılarda kuşatmanın yük

taşıyıcıları üzerindeki etkisi sonucu büyütme yönüne dik doğrultuda enerji spektrumu süreksizlik gösterirken (kuantize olurken) diğer iki yönde herhangi bir kısıtlama olmamaktadır.

İki boyutlu sistemlerde optik özellikler, kuantum kuyusunun ayarlanabilir parametreleri olan kuyu genişliği ve engel yüksekliğinin değiştirilmesi ile istenilen biçimde ayarlanabilir.



Şekil 1.6 Tip I sınıfı (sem) heteroyapıların enerji-bant şemaları: (a) tek-heteroeklem arayüzeyi, (b) çift-heteroeklem kuyu, (c) engel, (d) çoklu-kuantum kuyu ve (e) süperörgü. Dikkat edilirse, iki yarıiletken tabakasına tek-heteroyapı, üçüncü bir tabaka eklenirse çift-heteroyapı denmektedir. Örneğin semer tipi bir çift-heteroyapı, GaAs/AlGaAs/GaAs formunda bir engel olurken AlGaAs/GaAs/AlGaAs formunda ise bir kuyu olmaktadır. Burada L_W kuyu genişliği, L_B ise bariyer genişliğini temsil etmektedir.

Kuantum kuyu yapılar; büyütülen tabaka sayısına ve kalınlığına göre tekli kuantum kuyu, çoklu kuantum kuyu ve de süperörgü olmak üzere üç ana başlık altında toplanabilir. Tekli kuantum kuyu yapılarının artarda büyütülmesi ile çoklu kuantum kuyu ve süperörgü yapısı elde edilir. Çoklu kuantum kuyu ve süperörgü yapılarını birbirinden ayıran fark, komşu iki kuyu arasındaki bariyerin genişliğidir. Şekil 1.6'da gösterildiği gibi, çoklu kuantum kuyularında potansiyel bariyerinin genişliği, kuyu genişliğinden daha büyüktür. Yani kuyular birbiriyle etkileşme yapamayacak kadar uzak bir konumdadır. Süperörgülerde ise, bariyer genişliği kuantum kuyularına göre daha dardır. Bu durum kuyuların etkileşmesine sebep olacaktır. Nitekim bu yapılarda yüklü parçacıklar bir kuyudan diğerine tünelledebilmektedir. Süperörgüdeki bariyer kalınlıkları uygun kalınlıklarda seçilerek taşıyıcıların bariyeri geçip diğer kuyuya tünellemeleri sağlanır. Bu tarz heteroyapıların üretilmesindeki en önemli amaçlardan birisi yapının bant aralığını ayarlayarak taşıyıcıları daha hassas kontrol edebilmektir (Mitin, Kochelap ve Stroscio, 1999).

Kuantum kuyularının gelişiminin, yarıiletken lazerler ile örtüşmesi doğaldır. QWe'ler, her ne kadar günümüz lazer teknolojisinde yaygın olarak kullanılsa da daha verimli lazerler üretmek için yerini QWi'lere ve QD'lara bırakmaktadır.

b) Kuantum telleri (QWi):

Kuantum telleri; kuantum kuyu yapısının var olan iki doğrultudaki hareket edebilme serbestliğinin bir boyut daha düşürülmesiyle elde edilen yapılardır. Böyle bir yapıdaki taşıyıcılar sadece tek yönde serbest olurlar. Bu yüzden bu yapılara bir boyutlu yapılar denilir.

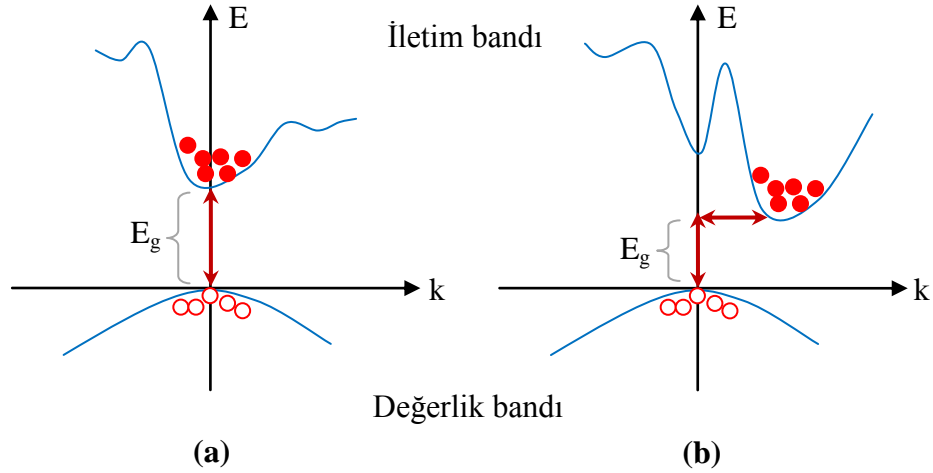
c) Kuantum noktaları (QD):

Kuantum kuyu yapısının iki doğrultuda kuşatılmış hali gibi düşünebilir. Bu yapılar, taşıyıcıların hareket edebilme serbestliği olmadığı için sıfır boyutlu yapılar olarak da

bilinir. Bir *kuantum nokta yapısı içine* hapsedilen taşıyıcıların enerjisi üç yönde de kuantize olur. Bu yapılar genellikle, nitrit tabanlı örgü uyumlu olmayan malzemelerin Stranski-Krastonow moduyla büyütülmesiyle üretilir.

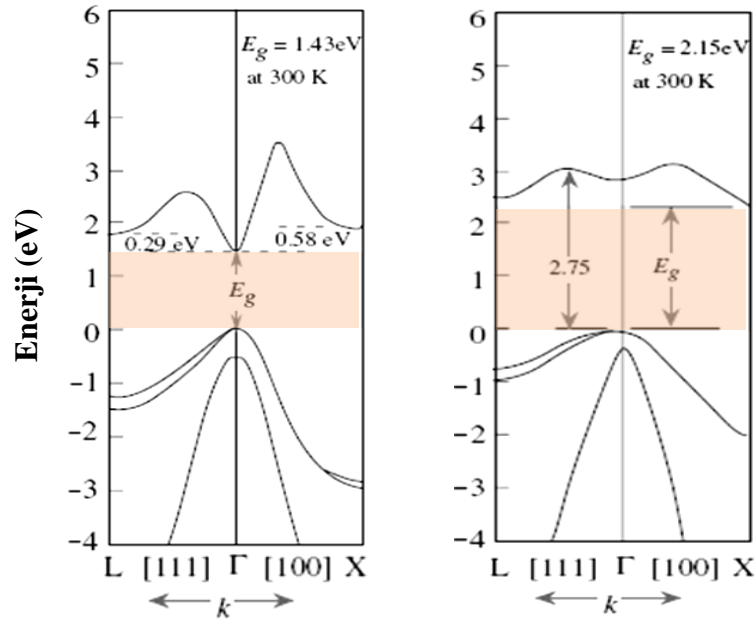
1.4. Bantlar Arası Geçiş

Yarıiletkenlerdeki taşıyıcıların E-k grafiği önemli bilgileri ihtiva eder. Şekil 1.7'de gösterildiği gibi, Enerji bantları arasındaki geçişlere göre yarıiletkenleri direkt (dolaysız) ve indirekt (dolaylı) olmak üzere iki sınıfa ayırabiliriz. Bir yarıiletkenin direkt veya indirekt bant aralığına sahip olması optik özelliklerini belirlediği için optoelektronik uygulamalarda kullanılıp kullanılmayacağını belirleyen en önemli kıstaslardan biridir.



Şekil 1.7 (a) Direkt (dolaysız) ve (b) indirekt (dolaylı) geçişlerin gösterimi. İndirekt geçişlerde momentum korunabilmesi için fonon momentumuna gerek duyulması bazı sıkıntıları beraberinde getirir. Bu açıdan özellikle optoelektronik teknolojilerinde direkt malzemeler tercih edilir.

Değerlik bandının tepesi referans noktası yani $\mathbf{k} = 0$ noktası olarak seçilir. Başka bir deyişle sadece bu noktadaki geçişler izinlidir. İletim bandının çukuru bu noktaya denk düşüp düşmemesine göre bant geçiş tipi belirlenmektedir. İletim bandı ile değerlik bandı arasındaki enerji, en düşük değerine $\mathbf{k} = 0$ 'da sahip ise bu tür yarıiletkenlere direkt bant aralıklı, eğer $\mathbf{k} \neq 0$ 'da sahip ise bu tür yarıiletkenlere de indirekt bant aralıklı yarıiletken denir. İndirekt maddelerde iletim bandının çukuru ile değerlik bandının tepesi aynı \mathbf{k} değerine sahip değildir. Bu yüzden bu tür geçişlerde momentum korunabilmesi için fonon momentumuna gerek duyulur. Bu durum, hem geçiş süresinin uzun olmasını hem de ışımsal verimin düşük olmasını kaçınılmaz kılar. Ayrıca iletim sürecine fononların dâhil olması yapının ısınmasına da sebebiyet vermektedir. Sonuç olarak indirekt malzemelerde iletim, elektronun bir fononla etkileşme ihtimaline bağlı olduğundan bu tür malzemeler optik aygıtlarda pek tercih edilmezler.



Şekil 1.8 Γ , X ve L vadilerini gösteren bant şemaları (Singh, 2003). Soldaki GaAs sağdaki ise AlAs için bant diyagramıdır. Dikkat edilirse; $k = 0$ 'da, GaAs için iletim bandının en düşük vadisi Γ iken AlAs'de X olmuştur. İşte bu fark, malzemenin bant tipini belirlemektedir. En düşük vadi Γ ise direkt (GaAs), değilse indirekt (AlAs) olmaktadır.

Şekil 1.8’de verildiği gibi direkt ve indirekt geçişli maddelerde Γ , X ve L gibi yüksek simetri noktaları bulunur. $k = 0$ ’a denk düşen iletim bandı çukuruna Γ vadisi denir. X ve L vadileri ise $k = 0$ ’a denk düşmez yani kabaca Γ vadisinin sağında ve solunda bulunurlar. Sonuç olarak, değerlik bandı ile iletim bandı arasındaki geçiş Γ vadisinde gerçekleşiyorsa direkt geçiş, L veya X vadisinde gerçekleşiyorsa indirekt geçiş özelliği görülmektedir.

1.5. Yarıiletkenlerde Katkılama

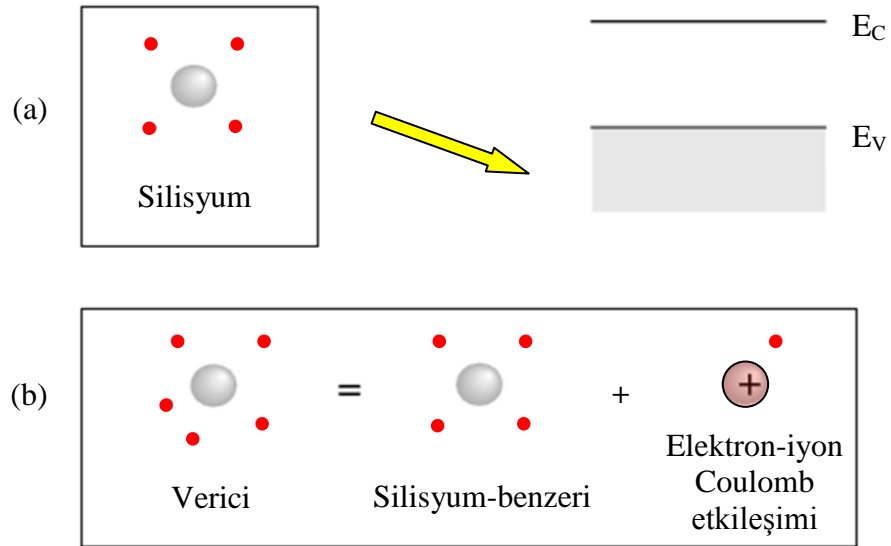
Oda sıcaklığında, herhangi bir yarıiletken kristalin değerlik bandındaki bazı elektronlar ısı yardımıyla iletim bandına geçerlerken geriye “deşikler” (hol) bırakırlar. Dolayısıyla, saf bir yarıiletkendeki elektronların sayısı iledeşiklerin sayısı eşittir. Buradaki elektron vedeşiklere öz-taşıyıcılar (intrinsic carrier) denir. İletim bandındaki akım, elektronlarla sağlanırken değerlik bandındaki akımdeşikler tarafından sağlanır. Teorik olarak, sıcaklık artışıyla üst banda elektron çıkışı artacağı, yani akım artacağı öngörülse de bu durum yarıiletken aygıtlar için elverişli değildir. Yüksek sıcaklıklarda, elektrik alan etkin bir şekilde kontrol edilemediğinden öz-taşıyıcılar bir sıkıntı kaynağı olmaktadır (Singh, 1994). Bu ve benzeri durumlar akımın tek tip taşıyıcı tarafından taşınmasını gerektirmektedir.

Kontrollü bir tarzda, saf bir yarıiletken içerisine yabancı atomların eklenmesine katkılama (doping), katılan atoma da katkı (dopant) yada safsızlık (impurity) atomu denir. Öyle ki, en basit yarıiletken aygıtlar bile bu aşamadan geçmelidir. Katkılama suretiyle, sadece elektronların (n-tipi) veya sadecedeşiklerin (p-tipi) çoğunlukta olduğu yarıiletkenler hazırlanabilir. Katkılama işlemi, farklı iletkenlik bölgelerine sahip yarıiletkenlerin üretilmesine olanak sağlar. Safsızlık atomları yarıiletkenin taşıyıcı konsantrasyonunu artırdığından, orantılı olarak malzemenin elektriksel özelliğini büyük ölçüde değiştirir. Örneğin, silisyum içine $1/10^5$ oranında Bor katıldığı zaman saf silisyumun oda sıcaklığındaki elektriksel

iletkenliği 1000 misli artar (Kittel, 1986). Safsızlık atomları, verici (donor) ve alıcı (acceptor) olmak üzere iki ana başlık altında toplanabilir.

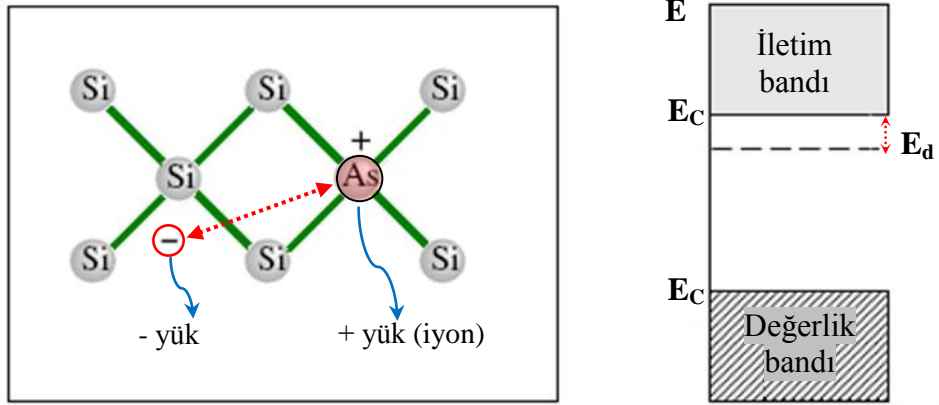
a) Verici (Donor)

Silisyum (Si) kristalini ele alalım. Si periyodik cetvelin IVA grubuna ait olduğu için 4 değerlik bağı bulunmaktadır. Örneğin, bu kristale VA grubundan arsenik (As) katıldığını düşünelim. Bu durumda arseniğin sahip olduğu beş değerlik elektronundan dördü yapının kovalent bağına katılırken biri boşta kalır. Bu fazla elektron, bağ kuramadığı için iletim elektronu olarak kristal içinde neredeyse serbestçe hareket edebilir. Bu tarzda, verici atomlarla katılan, başka bir deyişle yük taşıyıcısı başat olarak (-) yüklü elektronlar olan yarıiletkenlere n-tipi yarıiletken denilir.



Şekil 1.9 (a) Silisyumun son yörüngesindeki dört elektron da değerlik bandına gider. (b) Bu yapıya verici eklendiğinde, vericinin sahip olduğu beş değerlik elektronundan dördü yapının kovalent bağına katılır. (+) yüklü iyon haline gelen verici ile bir elektron arasında kulombik etkileşim kurulur.

Verici atomlar bir elektronlarını kaybettikleri için (+) yüklü hale gelirler. Boşta kalan elektron, bu iyonun çevresinde Coulomb potansiyeli etkisinde hareket eder. Fakat Coulomb etkileşmesi oldukça zayıftır ve parçacık hemen hemen serbest elektron gibi davranır (Şekil 1.9).

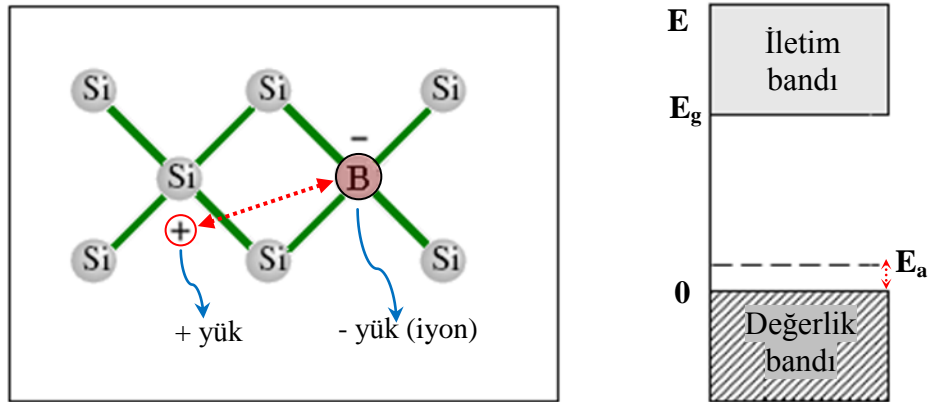


Şekil 1.10 Silisyumu n-tipi katkılama. Enerji şemasında görüldüğü üzere, verici seviyesi iletim bandına çok yakındır. Diğer bir deyişle, küçük bir enerji ile vericiler iyonlaşarak iletim bandına fazladan elektron verir. (+) yüklü verici ile fazla elektron yükler arasında kulombik etkileşim kurulur.

Vericinin elektronunu iletim bandına çıkartabilmek için gerekli olan enerjiye verici iyonlaşma enerjisi (E_d) denir. Vericinin enerji seviyesi; Şekil 1.10'da gösterildiği gibi enerji-bant şemasında, yasak enerji aralığı içerisinde ve iletim bandının hemen altındaki bir seviyede bulunur. Verici seviyeleri ile iletkenlik bandı arasındaki fark çok küçük bir değerdedir (~ 5 meV). Oda sıcaklığında bir elektronun ortalama ısısal enerjisinin 25 meV civarında olduğu hatırlanırsa bu enerji, verici seviyesindeki bir elektronun kolaylıkla iletim bandına geçmesini sağlayacaktır. Oda sıcaklığında, vericilerin neredeyse tamamı iyonlaştığı için bir n-tipi yarıiletkendeki elektron konsantrasyonu vericilerin sayısıyla orantılıdır.

b) Alıcı (Acceptor)

Katkı atomunun uygun seçimiyle, üst kısımda değinildiği gibi elektron fazlalığı değil de elektron eksikliği yani deşik (hol) oluşturulur. Bu kez, silisyum kristaline B, In, Al gibi IIIA grubu bir elementin eklenmesini düşünelim. Üç değerlikli katkı atomu, örgü içerisinde onu kuşatan dört Si atomuyla yapacağı dört kovalent bağdan birinde elektron eksik kalır. Bu eksiklik bir başka bağdan ayrılan elektron tarafından doldurulur. Böylece elektronun ayrıldığı yerde bir deşik oluşurken katkı atomu (-) yüklü hale geçer. Oluşan deşik kristal içerisinde hemen hemen serbestçe hareket edebilir durumdadır.



Şekil 1.11 Silisyumu p-tipi katkılama. Enerji şemasında görüldüğü üzere, alıcı seviyesi değerlik bandına çok yakındır. Diğer bir deyişle, küçük bir enerji ile alıcılar değerlik bandından elektron alarak bu banttaki deşik konsantrasyonunu artmasına neden olur. (-) yüklü alıcı ile deşik arasında kulombik etkileşim kurulur.

Oda sıcaklığında yeterli enerjiye sahip elektronlar, değerlik bandında bir deşik bırakarak iletim bandına çıkarlar. Bu tarzla, değerlik bandından bir elektron alabilen safsızlık atomuna alıcı denilir. Alıcılar ile katkılanan bir yarıiletkende yük taşıyıcıları (+) yüklü deşikler olduğundan bu tür yarıiletkenlere p-tipi yarıiletken denilir. Bu tür safsızlıkların enerji seviyesi Şekil 1.11'da gösterildiği gibi değerlik bandının biraz

üzerine denk düşer. Çizelge 1.1’de silisyumdaki p- ve n-tipi katkılama seviyeleri sayısal olarak bulunmaktadır (Quirk ve Serda, 2001).

Çizelge 1.1 Silisyumdaki katkılama seviyeleri.

Katkılama	Tipi	Katkılama konsantrasyonu (Atom/cm ³)			
		Çok hafif < 10 ¹⁴	Hafif 10 ¹⁴ - 10 ¹⁶	Normal 10 ¹⁶ - 10 ¹⁹	Ağır > 10 ¹⁹
Beş-değerlikli (Verici)	n	n ⁻	n ⁻	n	n ⁺
Üç-değerlikli (Alıcı)	p	p ⁻	p ⁻	p	p ⁺

Safsızlıkların eklenmesiyle kristalin sahip olduğu mükemmel periyodiklik bozulur. Sonuçta, oluşan fazlalık taşıyıcı ile iyonlaşmış katkı atomu arasında aşağıda verildiği gibi bir etkileşim potansiyeli (kulombik) bulunur.

$$U(r) = \frac{-e^2}{4\pi\epsilon r} \quad (1.2)$$

Burada ϵ dielektrik sabiti, r etkileşim yarıçapıdır. Şayet safsızlıktan dolayı zemin potansiyelinin değişimi zayıf ve etkileşim yarıçapı büyük ise “etkin kütle yaklaşımı” uygulanabilir (Singh, 1994). Bu yaklaşımda, katkı atomunun özellikleri hidrojenu atomu modeli ile betimlenir. Öyleyse, vericiler için enerji seviyesi şu şekilde basitleştirilebilir:

$$E_d = E_c - 13,6 \left(\frac{m^*}{m_0} \right) \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon} \right)^2 \quad \text{eV} \quad (1.3)$$

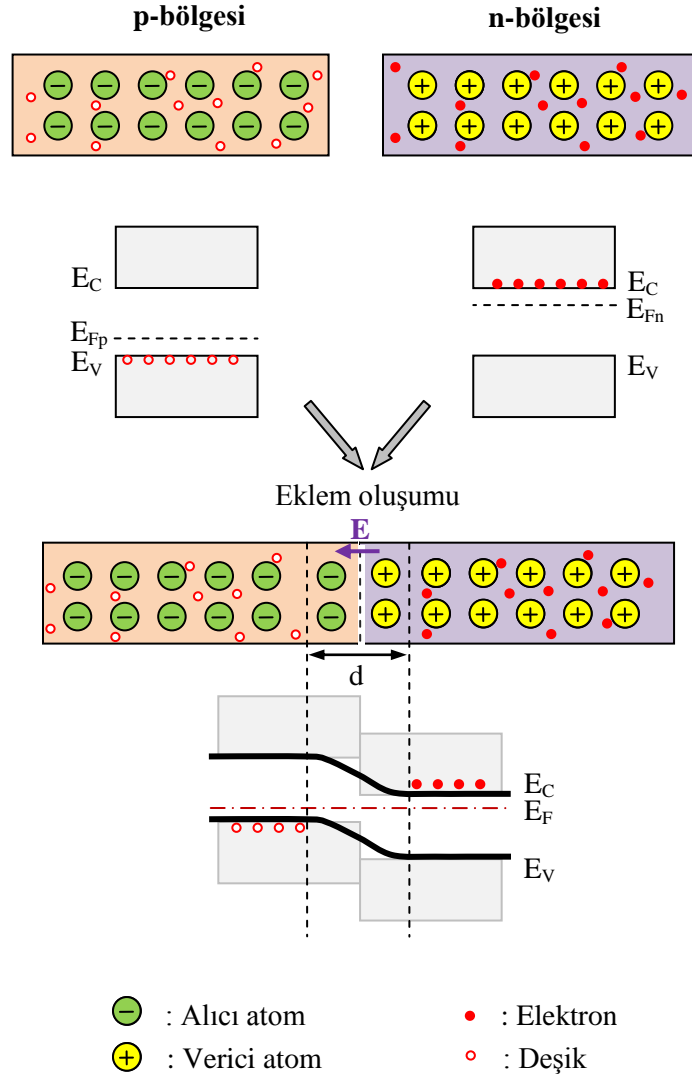
Burada E_d verici enerji seviyesi, E_c iletim bandı enerji seviyesi, m_0 elektron kütlesi, m^* ilgili malzemenin elektron etkin kütlesi, ϵ ilgili malzemenin dielektrik sabiti ve ϵ_0 da uzayın dielektrik sabitidir.

1.6. p – n Eklemi

p-tipi bir yarıiletken ile n-tipi bir yarıiletkenin bir araya getirilmesiyle oluşan yapıdır. Şekil 1.12'de gösterildiği gibi, böyle bir eklem p-tipi bölge, tüketim (depletion) bölgesi ve n-tipi bölge olmak üzere üç ayrı bölgeden oluşmaktadır. Temas halinde, n-bölgesindeki hareketli elektronlar p tarafına yayılırken arkalarında hareketsiz (+) iyon bölgeleri açığa çıkar. Benzer şekilde, deşikler de (-) yüklü iyon korlarını bırakarak n bölgesine yayılırlar. Böylece, difüzyon yoluyla küçük bir yük iletimi sonrasında, kesişimin p bölgesinde (-) yüklü alıcı iyon fazlalığı, n bölgesinde de (+) yüklü verici iyon fazlalığı oluşacaktır. Burada, çift yük tabakası nedeniyle n'den p'ye doğru bir elektrik alan meydana gelerek artık difüzyonu engelleyecektir. Yani iki tür yük taşıyıcıları da, artık ayrı bölgelerde kalacaktır. Ayrıca bu çift tabaka nedeniyle kristal içindeki elektrostatik potansiyel, eklem bölgesinde bir süreksizlik gösterecektir.

p- ve n-bölgelerinin temas kısmında hareketli yük taşıyıcıları azaldığı için eklemden itibaren birkaç mikronluk bu bölgeye tüketim bölgesi denir. Bu bölgede, $10^4 - 10^6$ V/cm mertebesinde bir iç elektrik alan kurulur (Serway, 1990). Bu iç elektrik alan hareketli yüklerin taraf değiştirmesini güçleştiren bir V_{bi} potansiyel engeli oluşturur. Eklem bölgesinden uzakta, p tarafında (-) yüklü alıcı iyonları ve buna eşit yoğunlukta deşikler bulunurken n tarafında (+) yüklü verici iyonları ve buna eşit yoğunlukta serbest elektronlar kalmaktadır. Diğer bir deyişle nötr bölgeler oluşmakta yani sistem dengeye gelmektedir. Tüketim bölgesinde taşıyıcı yoğunluğu

aşırı derecede düşük olduğundan, diğer bölgelere nazaran daha yüksek bir öz dirence sahiptir.



Şekil 1.12 Üst kısımda ayrı ayrı p- ve n- tipi bölge ve bunların bant şemaları ifade edilmektedir. Orta kısımda bu bölgelerin bir araya gelmesiyle oluşan eklem ve bu eklemin bant şeması verilmektedir. Dikkat edilirse, sistem dengeye geldiğinde eklemin E_F seviyesi düzdür.

p-n eklemının en önemli özelliklerinden birisi akımı yalnızca bir doğrultuda iletmesidir. Şekil 1.13’de gösterildiği üzere, düz beslemde (*forward bias*) yani eklemının p tarafına pozitif, n tarafına negatif bir dış gerilim uygulanması halinde, eklemının sahip olduğu yapısal potansiyel engel küçüldüğü için n’den p’ye çok daha fazla elektron geçmesi sonucunda birleşme akımında üstel bir artma oluşmaktadır. Ters beslemde (*reverse bias*) yani dış gerilimin çapraz uygulanması halinde elektrostatik potansiyel farkının artmasına sebep olur. Böylece elektronların potansiyel duvarını aşip diğer tarafa geçmeleri kısıtlanır. Bu durumda çok küçük, ters yönlü bir polarizasyon akımı oluşur ve polarizasyon gerilimi arttıkça hızlı bir şekilde I_0 gibi doyum değerine ulaşır.

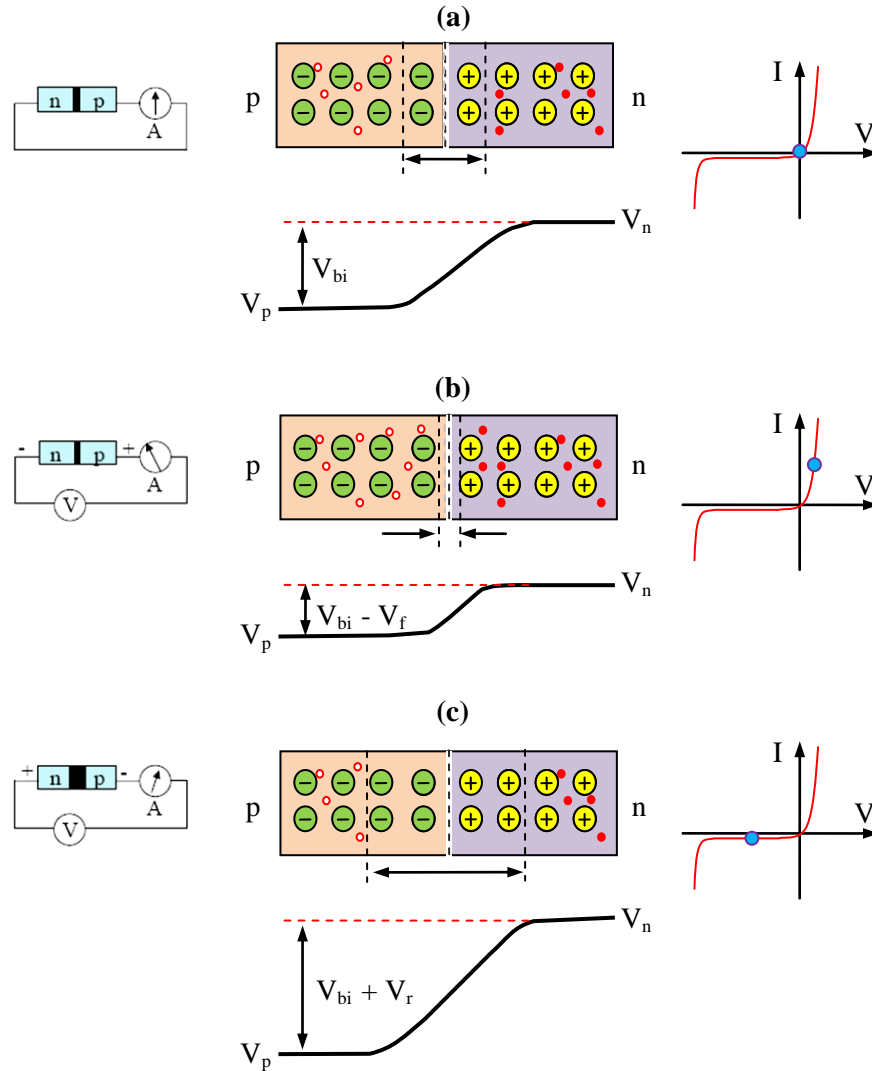
Bir p-n eklemının ters besleme için direnci, düz besleme durumuna göre çok daha büyük olduğu Şekil 1.13’deki I-V eğrisinden de görülebilir. Bu şekilde bir doğrultucu işlevi nedeniyle bir p-n eklem diyotu, elektronik devrelerdeki vakum diyotunun yerini almıştır. İdeal bir diyotta, pratikte doğru kutuplamada, iletimin başlaması için eşik geriliminin aşılması gerekmektedir. İdeal bir diyot için akım-gerilim ifadesi

$$I = I_0 (e^{qV/kT} - 1) \quad (1.4)$$

ile verilir. Burada q elektron yükü, k Boltzmann sabiti ve T kelvin olarak sıcaklıktır.

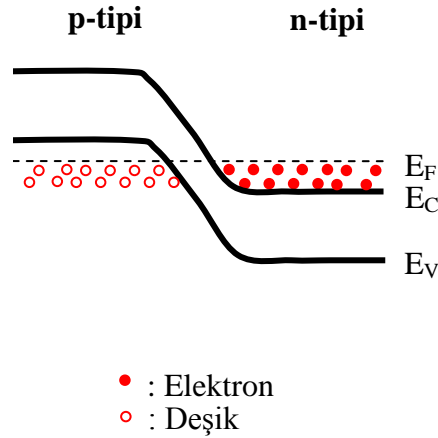
Ters beslemede kritik bir değer aşıldığında akımda oluşan ani artış olayına ters kırılma denir. Böyle bir yapıda, eklemının p tarafındaki değerlik bant tepesi, n tarafındaki iletim bant dibinin üzerinde bulunur. Bu durumda, p tarafındaki bir değerlik bant elektronu, n tarafındaki iletim bandında kendisi için aynı enerji seviyelerine sahip olabilir. Ancak, tüketim bölgesinde oluşan potansiyel engeli boyunca bu elektron için uygun enerji durumları olmamakla birlikte kuantum mekaniksel olarak tünelleme olayı ile geçebileceğine dair olasılık bulunmaktadır. Tünel akımı engel kalınlığının azalmasıyla üstel olarak artmaktadır. Böylece kritik bir

değerden sonra tünel akımının hızlı bir şekilde artması şeklinde bir ters kırılma olgusu Zener kırılması olarak bilinir. Kırılma bölgesinde, voltajdaki küçük bir artış ile akımda ani bir artış olması, ters beslemdeki p-n eklemelerinin değişik teknolojilerde kullanılması sağlamıştır. Bu tarz eklemelere Zener Diyot denilmektedir. Katkı düzeylerini değiştirerek kırılma voltajını ayarlamak mümkündür.



Şekil 1.13 Denge (a), düz beslemde (b) ve ters beslemde (c) p-n eklemi, potansiyel profilleri ve I-V eğrileri. Görüldüğü üzere, eklem potansiyeli ve tüketim bölgesi düz beslemde azalırken ters beslemde artmaktadır. Burada V_{bi} iç potansiyel, V_f düz beslem potansiyeli ve V_r de ters beslem potansiyelidir.

Daha önce tartışıldığı üzere normal bir katkılama seviyesinde Fermi düzeyi yasak bant aralığı içinde bulunmaktadır. Katkılama düzeyi çok fazla olduğunda, p-n eklemi ilginç bir görünüm kazanmaktadır. Nitekim aşırı katkılanan bir ekleme Fermi düzeyi; p tarafında değerlik bandında, n tarafında ise iletim bandında bulunur (Şekil 1.14). Yani, besleme yokken bile n tarafındaki iletim bandının dibi, p tarafındaki değerlik bandının tepesinden aşağıdadır. Böyle bir durumda, tüketim tabakası çok dar olduğundan, küçük bir düz beslemede geniş bir aralıkta tünel akımı oluşması söz konusudur. Düz beslemenin artmasıyla; n tarafındaki iletim bandı ve p tarafındaki değerlik bandı enerji düzeylerinin üst üste gelmesi ortadan kalkar. Bu noktadan sonra tünelleme artık olamaz ve akım geleneksel bir diyodun akım-voltaj karakteristiğine uymaya başlar. Bu tarz akım-voltaj karakteristiğine sahip cihazlar Tünel Diyot olarak bilinir (Hook ve Hall, 1999).



Şekil 1.14 Aşırı katkılanmış p-n eklemi. Herhangi bir besleme yokken, bile taşıyıcıların tünelleme olasılıkları yüksektir.

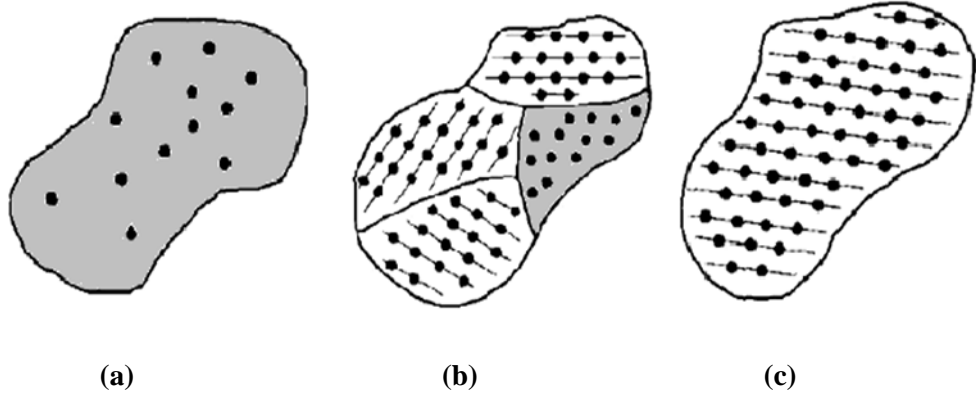
Bir takım belirgin özelliklerinden ötürü p-n eklemleri pek çok yarıiletken aygıtta kullanılmaktadır. Buraya kadar anlatılanları kısaca özetlersek, LDS'lerin

önemli özellikleri vardır. Bu özellikler kullanılarak en basitinden bir pn eklemi yapabiliriz. Bu eklem ise uygun şartlarda ışımı yapan ya da kontrollü akım ileten devreler yapmamıza olanak sağlar. İleride örneklerini vereceğimiz bu yapılar değişik epitaksiyel kristal büyütme teknikleriyle elde edilebilmektedir.

2. EPİTAKSİYEL BÜYÜTME TEKNİKLERİ

2.1. Giriş

Katıları amorf, polikristal ve tek kristal olmak üzere üç genel başlıkta özetleyebiliriz. Materyaller içerdikleri düzenli bölgelerin büyüklüğü ile karakterize edilirler. Burada düzenli bölgeden kasıt geometrik bir düzenlenme ve/veya periyodikliğe sahip atomların/moleküllerin bulunduğu uzaysal hacimdir. Amorf malzemeler sadece birkaç atomik/moleküler boyut içinde bir düzene sahip iken, bu durum polikristal malzemelerde daha yüksektir. Aslında polikristal malzemeler çok sayıda düzenli bölgeciği bünyesinde barındırır. Bu düzenli bölgelerin (tek kristal bölgeleri) her biri farklı yönelim ve boyuttadır.



Şekil 2.1 Katı tipleri. a: amorf, b: polikristal, c: tek kristal

Tek kristal malzemeler ise ideal olarak yüksek derecede düzenlidir. Böyle bir malzeme, tüm hacminde düzgün bir geometriye sahiptir. Tek kristallerin elektronik ve optik teknolojisinde oldukça önemli bir yeri vardır. Diğer tip malzemelere göre bu malzemelerin elektriksel özellikleri daha üstündür. Çünkü tek kristallerde diğer

türlerde bulunan bölgecikler bulunmaz. Dolayısıyla bölgecik sınırları da bulunmayacağı için çarpışmalar azalacak yani yük iletimi çok daha rahat olacaktır. (Neamen, 2003). Şekil 2.1’de amorf, polikristal, tek kristal malzemelerin iki boyutlu gösterimleri bulunmaktadır.

Sağladığı birçok avantaj bakımından, yarıiletken malzemeleri tek-kristal formda büyütmek yarıiletken teknolojisinin önemli uğraşlarından biridir. Bu çalışma kapsamında, önemli tek kristal epitaksiyel büyütmek teknikleri üzerinde durulacaktır.

2.2. Epitaksi

Çeşitli külçe kristal büyütmek teknikleriyle elde edilen bir alttaşın üzerine bir dizi kristal film tabakası büyütmek suretiyle yarıiletken aygıtlar üretilir. Öyle ki, en basit yarıiletken aygıtın bile bu aşamadan geçmesi gerekmektedir. Alttaşın kristal yapısı üzerine tabaka büyütmek sürecine *epitaksi (epitaxy)* denir. Epitaksi terimi köken olarak Yunanca iki kelimenin birleşmesinden oluşmaktadır. *επι (epi)* sözcüğü üst, ön, yerleştirilmiş ve *ταξις (taxis)* sözcüğü de tertipleme anlamına gelmektedir. Bu iki sözcükten türeyen epitaksi kelimesi ise uygun bir alttaş üzerine film tabakaların alttaş düzenlemesine uyarak tek kristal formda büyütülmesi anlamını taşımaktadır.

Başlıca iki temel sebepten dolayı epitaksiyel büyütmelere başvurulur. Birincisi, alttaştan daha yüksek saflıkta arzulanan kalınlıkta, arzulanan katkılama tipinde ve seviyesinde film tabakaları büyüterek düşük boyutlu yapılar (LDS) üretmektir. Bu yapılar, kuantum etkileri neticesinde çok önemli uygulama alanlarında kullanılmaktadır. İkincisi, külçe kristal büyütmek teknikleriyle büyütülemeyen bileşik kristaller üretebilmek için kullanılır.

Alttaş ile büyütülen film arasındaki ilişkiye göre homoepitaksi ve heteroepitaksi olmak üzere iki tip epitaksi vardır. Her iki türünde oldukça geniş bir yelpazede pratik örnekleri bulunmaktadır.

2.2.1. Homoepitaksi

Homoepitaksiste alttaş ve büyütülen film aynı malzemedendir. Doğal olarak; homoepitaksiste büyütülen film tamamıyla alttaş ile eşleşmektedir. En yaygın olarak kullanılan homoepitaksi formu, silikon alttaş üzerine silikondur. Örneğin Czochralski tekniğiyle elde edilen silisyum wafer (pul, hamyonga) bir dizi işleme tabi tutulduktan sonra çeşitli epitaksiyel büyütme teknikleriyle silikon alttaşı üzerine arzulan kalınlıkta, arzulan katkılama tipinde ve seviyesinde silikon tabakaları büyütülebilir.

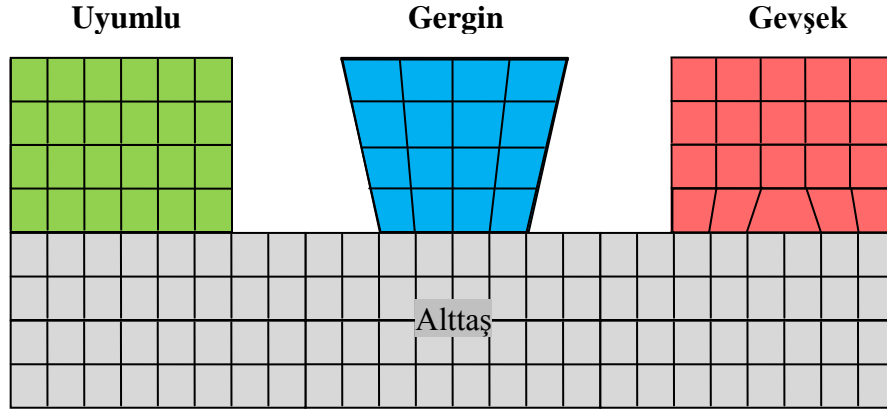
2.2.2. Heteroepitaksi

Alttaş üzerine farklı bir materyalin tek kristal tabakasının büyütülmesidir. Bu başlık altında safir (Al_2O_3) alttaş üzerine GaN, GaAs alttaş üzerine InP büyütümünü örnek verebiliriz. Bazı malzemelerin tek-kristal olarak alttaşı üretilmediği veya çok pahalı olduğu için (örneğin GaN alttaşlar) değişik alttaşlar üzerine epitaksiyel büyütme yapılmaktadır. Ancak bu durum, alttaş ile büyütülen film tabakası arasında dislokasyonlu bir bölgenin oluşmasına neden olmaktadır. Alttaş ile film farklı malzemelerden olduğu için; örgü parametrelerinde ve termal genişleme katsayılarında doğal olarak farklılıklar söz konusudur. Bu farklılıklara bağlı olarak büyütülen film tabakalarında gerilmeler veya gevşemeler söz konusudur. İstenmeyen dislokasyonları azaltabilmek için, genellikle alttaş üzerine uygun bir 'geçiş tabakası' (buffer layer, nucleation layer) büyütüldükten sonra film tabakaları büyütülmeye başlanmaktadır.

Heteroepitaksiyel büyütme örnekleri oldukça geniş bir alanda kullanılmaktadır. İlk olarak, safir (Al_2O_3) alttaş üzerine silikon büyütülmesi verilebilir. Çeşitli epitaksiyel büyütme teknikleriyle safir alttaş üzerine silikon biriktirebilir. Büyütülen bu epitaksiyel tabakalar, silikon alttaşı kullanılarak yapılan büyütme ile kıyaslandığında daha kusurludurlar. Ancak, CMOS aygıtlar yapmak için yeterince iyi olan bu yöntem ekonomik olması ve iyi bilinen bir teknik olması nedeni ile tercih edilmektedir..

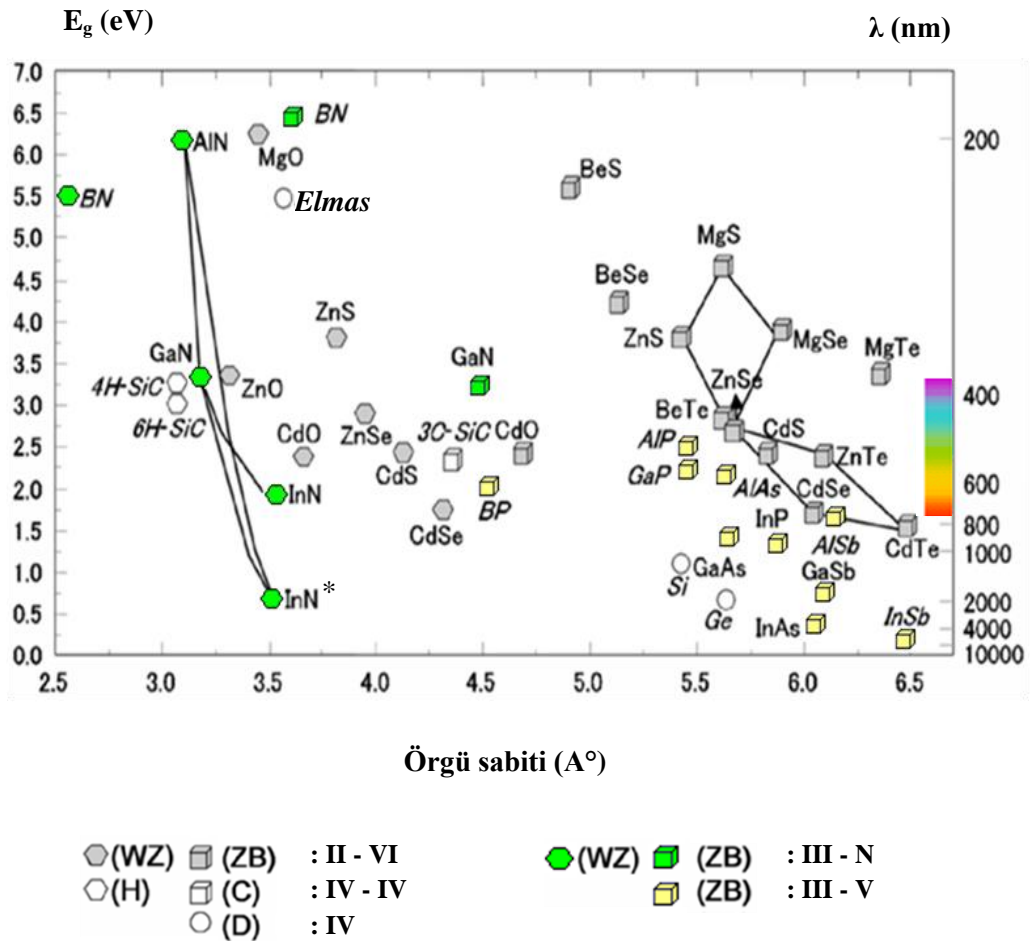
Geniş bir yelpazede kullanılmakta olan, GaAs alttaş üzerine çeşitli kompozisyonlarda AlGaAs biriktirmek suretiyle hazırlanan GaAs tabanlı lazerleri bu başlıkta verebiliriz. Bu yapının örgü parametreleri birbirine çok yakın olduğu için galyum atomlarının yerini alan alüminyum atomları önemli bir problem oluşturmazlar.

Bir diğer örnek olarak InP alttaşı üzerine InGaAsP yapısını verebiliriz. Bu yapıyla üretilen lazerler, mikron mertebesinde (1,55 μm) yayınımlar yaptıkları için ve bu yayınımlar silika fiberler içinde bozulmadan rahatlıkla iletilebildiği için telekomünikasyon sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Burada P örgü uyumunu sağlamak için eklenmektedir.



Şekil 2.2 Alttaş üzerine bir malzeme büyütülürken karşılaşılan durumların şeması. Soldan sağa doğru sırayla uyumlu (matched), gergin (strained) ve gevşek (relaxed) büyüme söz konusudur. Son iki durum başat olarak alttaş ile epitaksiyel tabakanın örgü parametrelerinin denk olmayışından kaynaklanmaktadır. Gevşek yapıda; ilkin yaklaşık tek-tabaka kalınlığında uygunsuz (misfit) dislokasyonlu bir tabakadan sonra biriktirilen malzeme kendi örgü parametresiyle büyür. Uygunsuz dislokasyonlar büyütülen tabakaların tek-kristal yönelimini ve yüzey elektronik özellikleri değiştirecektir.

Başka bir güncel örnek, galyum nitrit (GaN) mavi LED'leri ve lazerleridir. Galyum nitritin tek-kristal alttaşının üretilmesi aşırı derecede zor olduğundan büyütülecek film tabakaları bir tampon bölgeden sonra çeşitli alttaşlara heteroepitaksiyel olarak büyütülmektedir (Dikme, 2006). Bu yapılar, yüksek performanslı elektronik ve optoelektronik aygıtlar başta olmak üzere geniş bir yelpazede kullanılmaktadır.



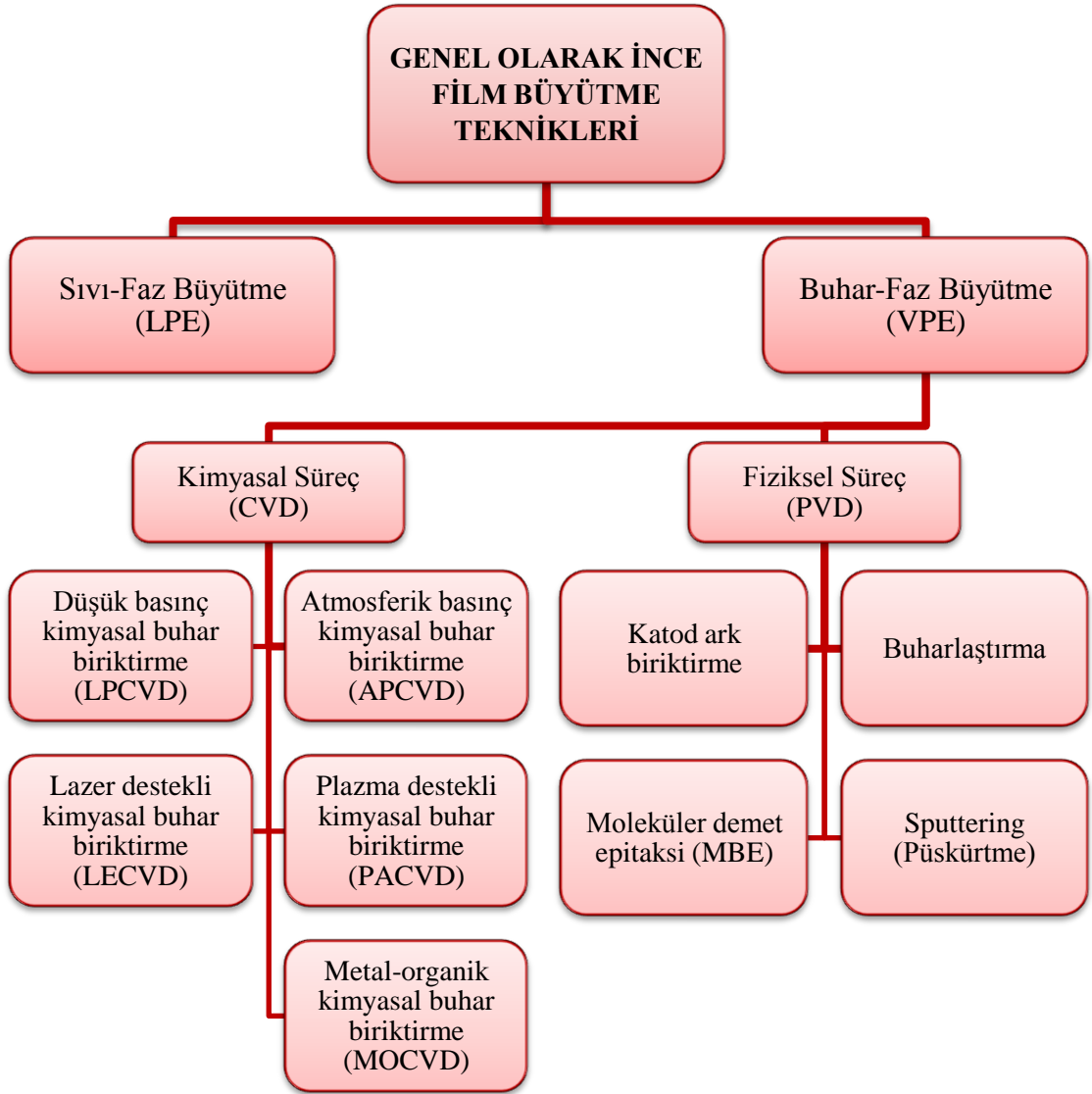
Şekil 2.3 Bazı yarıiletken bileşiklerin örgü parametreleri, bant aralıkları ve bu aralıktan salınan ışığın dalga boyu (300 K). *İtalik* yazı bant tipinin indirekt olmasını ifade eder. WZ: wurtzite, ZB: çinko-sülfür, H: hekzagonal, C: kübik, D:elmas örgüyü temsil eder. Not: son zamanlarda rapor edilen bant aralığı $\sim 0,7$ olan yeni InN bileşiği * ile belirtilmiştir [(Takahashi K., Yoshikawa A. ve Sandhu A, 2007) 'den sonra]

Homoepitaksizde büyütülen film alttaş ile aynı malzemeden olduğu için herhangi bir problem oluşmamaktadır. Heteroepitaksizde ise aynı durum söz konusu değildir. Alttaş ile film farklı malzemelerden olduğu için; doğal olarak örgü parametreleri ve ısıl genleşme katsayıları farklı olacaktır. Bu farklılıklara bağlı olarak büyütülen film tabakalarında Şekil 2.2’de gösterildiği gibi gerilmeler veya gevşemeler kaçınılmazdır. Bu dislokasyonların uygunsuz olanları istenilmemektedir. Çünkü bunlar büyütülen tabakaların tek-kristal yönelimini ve yüzey elektronik özelliklerini bozacaktır. Ayrıca, bu durumdan dolayı oluşan açık bağlar (*dangling bonds*), kimyasal reaktifliği teşvik edecektir.

Şekil 2.3’de bazı yarıiletken bileşiklerin örgü parametreleri, bant aralıkları gösterilmektedir. Mükemmel bir epitaksi için alttaş ile film arasındaki uyumsuzluk en asgari düzeyde olmalıdır. Ama bazen CeO_2 üzerine silikon örneğinde olduğu gibi oldukça iyi örgü uyumu olmasına rağmen iyi epitaksi oluşmaz, çünkü örgü uyumu önemli bir parametre olmasına karşın tek parametre değildir (Jackson, 2004). Ayrıca materyallerin kimyası da bağlayıcı bir faktördür. Bu yapıların büyütülmesinde ön bilgilerden ziyade deney sonuçlarını dayanak almak daha yerinde bir karar olur.

Kuantum kuyularının ve süperörgülerin keşfiyle orantılı olarak yarıiletken aygıtlarda da bir devrim yaşanmaktadır. Her geçen gün değişik özellikli aygıtlar üretilmektedir. Bu aygıtların üretim kademesinde yapılan epitaksiyel işlemler son derece önemlidir. Epitaksiyel teknikler prensipte başat olarak şu gereksinimleri karşılamalıdır. Mükemmel homojenlikte ve saflıkta; daha geniş bir alan üzerinde büyütülen film kalınlığı tekdüze olmalı ve hassas bir şekilde kontrol edilebilmelidir. Dahası, alttaş ile epitaksiyel tabakalar arasında çok keskin (net) arayüzeyler olmalıdır ve tabakalar arasındaki uygunsuz dislokasyonlar mümkün olduğunca giderilmelidir. İşte bu gereksinimleri karşılamak amacıyla epitaksiyel büyütme teknikleri geliştirilmiştir. Bu tekniklerin bir kısmı Şekil 2.4’de özetlenmiştir. Bununla birlikte, bu çalışma kapsamında, MOCVD tekniğini daha iyi kavrayabilmek amacıyla birkaç önemli teknik üzerinde durulacaktır. Bu teknikler sırayla: LPE (Likit Faz Epitaksi),

VPE (Buhar Faz Epitaksi), CVD (Kimyasal Buhar Biriktirme) ve MBE (Moleküler Demet Epitaksi)'dir.



Şekil 2.4 Genel olarak ince film büyütme teknikleri.

2.3. Likit Faz Epitaksi (LPE)

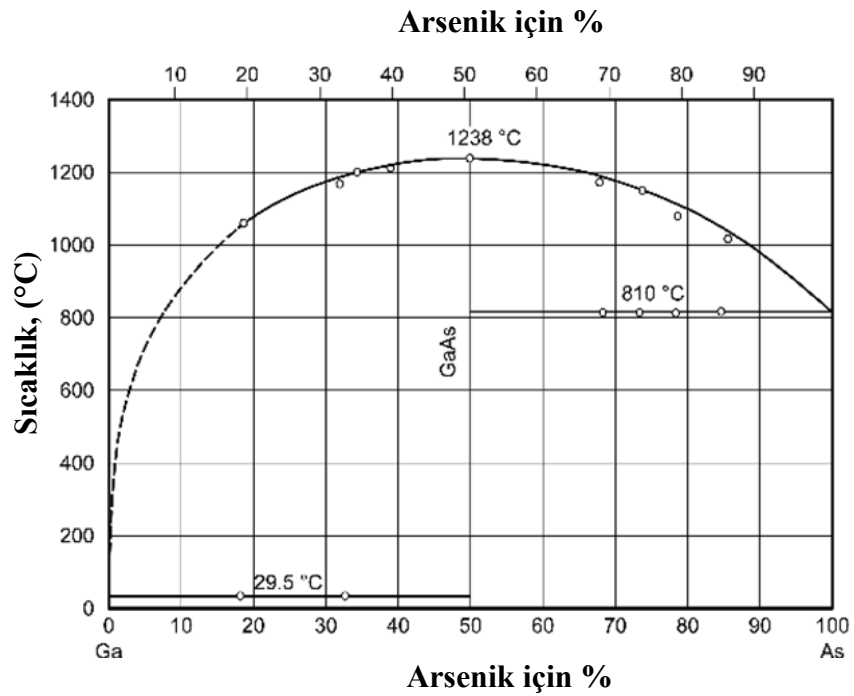
Likit faz epitaksi (LPE) tekniğiyle Alferov 1969'da oda sıcaklığında çalışabilen cw (sürekli dalga) lazer diyot üretmiştir. Bu alışma Alferov'a 2000 yılının Nobel fizik ödölünü getirmiştir (Byrappa ve Ohachi, 2003). Yine bu teknik, InP tabanlı aygıtlar başta olmak üzere birçok aygıtın üretilmesinde ilk olarak kullanılmıştır. LPE termodinamik dengede gerçekleşen bir büyütme tekniğidir. İlk yarıiletken bileşikler LPE ile büyütölmüştür ve bu teknik hala fabrikasyon üretim amaçları ile yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak daha özel üretim amaçlarına cevap veremediğinden, kontrolü daha yüksek olması nedeni ile daha fonksiyonel olan buhar faz epitaksi teknikleri geliştirilmiştir.

Likit faz epitaksiyi, genellikle kuvars bir tüpün içerisinde, uygun bir alttaş üzerine bir materyalin aşırı soğutulmuş eriyiğinin çökeltilmesi şeklinde açıklayabiliriz. Büyütme araç-gereçleri ilk defa Nelson tarafından geliştirilmiştir. Alttaş üzerinde oluşan tabakanın kompozisyonunu büyük oranda denge faz diyagramı belirler. Ayrıca, alttaş yöneliminin de etkisi vardır. LPE sisteminde büyütmeyi etkileyen üç temel unsur vardır. Bunlar eriyiğin kompozisyonu, büyütme sıcaklığı ve büyütme süresidir.

Tipik bir LPE reaktörü yatay bir fırından ve hareketli bir grafit potadan oluşur. Uygun bir ortamda, grafit pota içerisine yerleştirilen eriyik sıcak bir fırına sürölür. Alttaş, doymuş çözelti ile temas ettirilir. Dengeye gelindikten sonra, sıcaklığı azaltmak suretiyle çözeltinin alttaş üzerinde katılaşması sağlanarak epitaksiyel tabakalar büyütölür. Çözeltinin alttaş üzerinde bulunma süresi büyütölen tabakanın kalınlığını doğrudan belirler.

LPE'nin işleyişi için büyütölecek malzemelerinin faz diyagramlarının bilinmesi gereklidir. şekil 2.5'te Ga ve As'in faz diyagramı verilmiştir. Burada uygun bir faz geçişi temsil edilmektedir. Ga ve As, karışım içinde eşi oranda oluncaya dek yani GaAs bileşiği oluşuncaya dek karışımda bir bileşen fazlaca bulunur. Bu yüzden

faz diyagramını birinci olarak Ga – GaAs ve ikinci olarak GaAs – As faz diyagramına ayırmakta fayda vardır. Belirli bir seviyeden sonra, sıcaklık değişimiyle herhangi bir kimyasal değişimi olmadığına kararlı bir GaAs bileşiği oluşmaktadır (Fahrner, 2005). Daha sonra elde edilen saf GaAs bileşiği uygun bir alttaş üzerinde soğutulur katılaştırılır. Eğer faz diyagramının sol tarafında çalışılırsa oluşan karışımın içinde Ga damlacıklarının (*droplet*) olması kaçınılmazdır. Bu durum, karışımın galyumca zengin olmasını sağlayacaktır. Benzer şekilde faz diyagramının sağ tarafında çalışılırsa aynı durumlar As için geçerli olacaktır.



Şekil 2.5 Ga - As faz diyagramı (Fahrner, 2005)

LPE ile epitaksiyel tabakalar büyötmek için kullanılan konfigürasyonları üç başlık altında toplayabiliriz. Bunlar yığıdırma (tipping), daldırma (dipping), kaydırma

(sliding). Bunlardan sonuncusu çok-tabakalı yapılar büyütebilmek için nispeten daha elverişlidir.

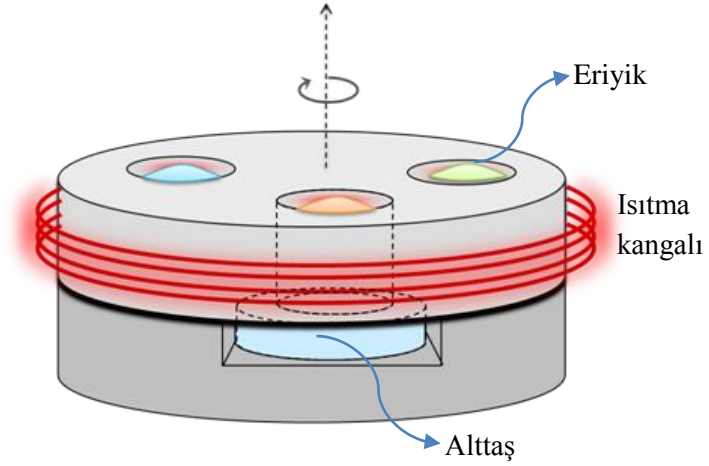
Yığıdırma: Potanın bir ucuna alttaş yerleştirilir. Bu potanın diğer ucunda ise biriktirilecek malzeme, uygun bir kıvama gelinceye kadar ısıtılır. Daha sonrasında, pota eğilerek eriyiğin alttaş üzerine yığılması sağlanır. Bu esnada sistem aşırı soğutularak eriyiğin alttaş üzerinde katılaşması, yani, epitaksiyel tabakanın büyütülmesi gerçekleşir. Arzulanan kalınlık ayarlamak için bir miktar beklendikten sonra pota tekrar eski konumuna getirilerek artan eriyik alttaştan uzaklaştırılır. Eğer çözeltiyi oluşturan bileşenlerden biri uçucu ise (GaAs'te As gibi) emniyetini sağlamak ve de çözelti konsantrasyonunu korumak için sistemin sızdırmaz olması gerektirir.

Daldırma: Yukarıdaki işlemin bir bakıma tersidir. Burada alttaş, içinde çözelti bulunan potaya daldırılır ve bir miktar beklendikten sonra tekrar çekilir.

Kaydırma: Daha önce bahsedilen iki teknikte heteroyapılar ve eklemler (junction) için gerekli olan farklı kompozisyonda çoklu-tabakalar büyütmek elverişli değildir. Bu durumu kısmen de olsa aşmak için kaydırma tekniği geliştirilmiştir. Şekilde 2.6'de gösterildiği gibi üst platformundaki her bir kutunun içinde farklı kompozisyonlu eriyikler bulunmaktadır. Alttaş bulunan platform, kutuların altından kaydırılarak çoklu tabakalar büyütülür. Bu platformlar genellikle grafitten olduğu için kutu içerisinde bulunan eriyikler kutu kenarlarına veya alt platforma yapışmadan sadece alttaş üzerine birikir. Alttaş soğumaması için sistem kontrollü bir şekilde ısıtılmalıdır.

LPE ile özellikle InP tabanlı materyaller büyütmek oldukça avantajlıdır. Bunun nedeni olarak; kullanılan donanımın oldukça sade başka deyişle ucuz olması, düşük kusur yoğunluğu yani yüksek saflıkta tabakalar büyütebilme ve birikinti oranının yüksek olması gibi özellikler sıralanabilir.

Büyütme esnasında epitaksiyel tabakaların kalınlığını hassas bir şekilde ayarlamak oldukça zor olduğundan keskin arayüzeyler ve ince katmanlar gerektiren bazı kuantum yapılarının üretilmesinde bu teknik pek tercih edilmez. Yüksek saflıkta epitaksiyel tabakalar büyütebilmesine karşın tabaka kalınlığının tekdüze olmayışı, yüzey ve arayüzey morfolojisinin pürüzlü olması, keskin arayüzeyli çoklu-tabakalar büyütme konusundaki kısıtlamalar bakımından LPE teknolojisi diğer tekniklere göre geri kalmıştır.



Şekil 2.6 LPE ile heteroyapılar büyütebilmek için geliştirilen kaydırma tekniğinin şeması. Üst platformundaki her bir kutunun içinde farklı kompozisyonlu eriyikler bulunmaktadır. Alttas bulunan platform, kutuların altından kaydırılarak çoklu tabakalar büyütülür.

Her ne kadar büyütme oranının yüksek olması istenilen bir olgu olmasına rağmen tekrar erime yani üst tabaka büyütülürken alt tabakaların eriyerek bozulması etkisinden dolayı, 100 A° genişlikli çoklu kuantum kuyularının (MQW) veya süperörgülerinin (SL) büyütülmesi aşırı derecede zordur (Razeghi, 1989).

LPE ile birkaç atom kalınlığında epitaksiyel tabakalar büyütme neredeyse imkânsızdır. Bu durum; daha fonksiyonel ve kompleks tekniklerinin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Bunlara ek olarak LPE ile seçici epitaksi yapılamaz. Daha gelişmiş

epitaksiyel büyütme sistemleri ile kıyaslarsak; yukarıdaki kısıtlamalara ek olarak, dâhili karakterizasyon sisteminin olmayışı, örgü-uyumsuz yapıların büyütülememesi ve de alaşım kompozisyonunda ve katkılamada hassas değişimlere imkân tanıyan bir prosedürün olmayışı sıralanabilir.

2.4. Buhar Faz Epitaksi (VPE)

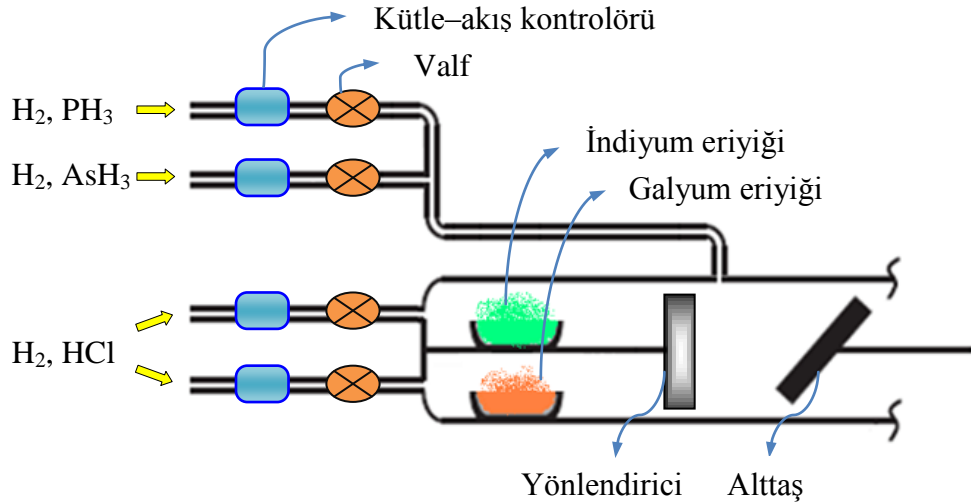
LPE ile heteroyapılar büyütebilmek için kaydırma tekniği geliştirilmiş olsa da bu yöntem artan gereksinimleri layığı ile karşılayamamaktadır. Bu yüzden Buhar faz epitaksi (VPE) tekniğinin doğması kaçınılmaz olmuştur. Bu teknikte kullanılan önkaynaklar (precursors) buhar formda olduğu için yapılan epitaksiyel işlemlere birçok yönden esneklikler sunmaktadır. Örneğin; elektronik kütle akış kontrolörleri kullanılarak reaktör odasına gaz girişi hassas bir şekilde ayarlanabilir. Bu, büyütülen tabakaların kalınlıklarının hatasız bir şekilde ayarlanmasının yanı sıra katkılama (dopant) prosedüründe de önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu durum farklı konsantrasyonlu, farklı katkılama düzeyli ve hatta alttaştan farklı bir katkılama tipinde epitaksiyel tabakalar büyütebilmeyi mümkün kılmaktadır. Ayrıca LPE ile büyütme yapılabilmesi için ilgili kaynağın sıvı formda tutulması gerekmektedir. Dahası, sıvıların birbiri içinde karışabilir olması da gerekmektedir. Bununla beraber bazı kaynakların aynı sıcaklık skalasında sıvı formda tutulması termodinamik olarak aşırı derecede zordur. Bu yüzden ilgili kaynakları buhar formda kullanmak genellikle daha avantajlıdır. İlâveten, entegre devre üretiminde oldukça büyük bir öneme sahip ‘seçmeli epitaksi’yi LPE ile gerçekleştirmek aşırı derecede problemlidir. Bu ve benzeri açılardan düşünüldüğünde kullanılan kaynakların gaz formda olması büyük avantajlar sağlamaktadır. Dolayısıyla VPE tekniği büyük oranda tercih edilmektedir.

Tıpkı LPE gibi VPE de termodinamik denge şartında gerçekleşen bir tekniktir. Ama LPE den farklı olarak bu teknikte kullanılan kaynaklar gaz formdadır. Bu teknikte genellikle kaynak materyaller, alttaşa göre daha sıcaktır. Buhar faz epitaksi

(VPE) tekniği ilk defa Tietjen ve Amick tarafından GaAsP alaşımı büyütülmesinde tanıtılmıştır (1966).

Bu teknik ile  rneğin, Ga(In)AsP b y tmek için; arsin (AsH_3) ve fosfin (PH_3)  nkaynakları sırayla arsenik (As) ve fosfor (P) elde etmek için V grubu elementi kaynağı olarak ve de saf galyum (Ga) ve indiyum (In) metalleri III grubu elementi kaynağı olarak kullanılır. Genellikle taşıyıcı gaz olarak hidrojen tercih edilir. Ayrıca, HCl'  de taşıyıcı olarak kullanılan sistemler vardır.

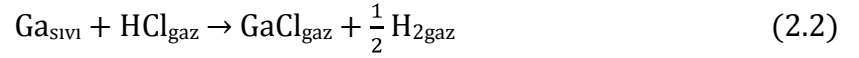
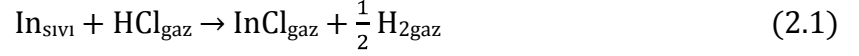
Genellikle, kuvarstan olan VPE reaktörü, farklı sıcaklık bölgelerine sahip çok-bileşenli bir fırın içinde bulunmaktadır. Reaktörü; III grubu kaynaklarını sentezleme, V grubu  nkaynaklarını pirolizleştirme ve büyütme (biriktirme) bölgesi olmak üzere üç kısıma ayırabiliriz.



Şekil 2.7 Tipik bir VPE reaktörünün şeması

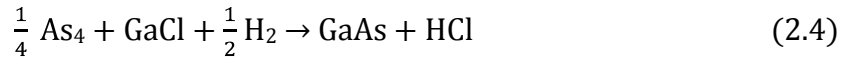
Somut bir örnek olarak InP ve GaAs b y t m n  ele alalım. Şekil 2.7'de gösterildiği gibi, ilk aşamada, 750-850  C sıcaklığında tutulan (InP ve GaAs için) birinci bölgede, küçük kaplardaki erimiş saf metaller (Ga, In) ile hidrojen klorür

(HCl) reaksiyona girerek III grubu kaynakları sentezlenir. Denklem (2.1) ve (2.2)'de gösterildiği gibi bu reaksiyonlar sonucunda oluşan buhar formdaki III-klorür ürünleri büyütme bölgesine aktarılır.



İkinci bölgede, arsin ve fosfin gibi gazlarının piroliz reaksiyonları sonucunda V grubu elementleri sağlanır. Bu gazları ayrıştırmak için ilk bölgeye göre daha yüksek sıcaklıklar gereklidir.

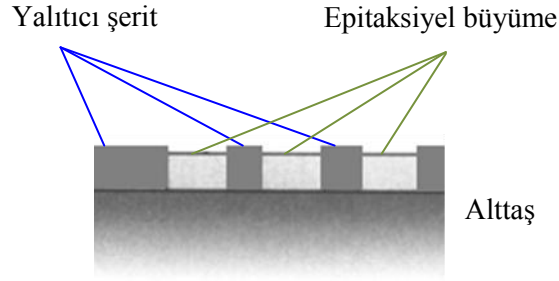
Daha sonrasında, bu bölgelerde hazırlanan gazlar daha düşük sıcaklıkta tutulan biriktirme bölgesine (680-750 °C) aktarılır. Burada, sıcaklığın düşmesinden dolayı ilgili ürünler yoğunlaşarak denklem (2.3) ve (2.4)'de gösterildiği gibi alttaş üzerinde kristal büyümesi gerçekleşir.



VPE tekniği, LPE ye göre çok daha kompleks bir donanıma sahip olmakla birlikte birçok esnekliği de beraberinde getirmektedir. MOCVD ve MBE tekniklerine göre çok daha ucuzdur.

LPE ile kıyaslırsak bu teknik, yüksek biriktirme hızı ve aynı anda birden çok wafer üzerinde kristal büyütebilme imkânı sunmaktadır. Ayrıca, gaz akışını kontrol ederek arzulanan kompozisyonlu epitaksiyel tabakalar üretebilme ve hassas katkılama yapabilme (doping) açısından gayet elverişlidir.

VPE tekniğinin en büyük avantajlarından biri seçmeli epitaksi yapabilmesidir (Şekil 2.8). Bu olay, hemen hemen tüm elektronik aygıtlarda kullanılan monolitik entegre devrelerin yapımında muazzam üstünlükler sağlamaktadır. Örneğin, maskeleme tekniği yardımıyla SiO_2 veya SiN_4 (yaygın olarak kullanılan yalıtıcılar) şeridi eklenen bir InP alttaşın üzerine InP tabanlı malzemeler büyütülmesinde, yalıtıcı şerit üzerinde herhangi bir büyüme olmaz iken alttaş üzerinde ilgili malzemenin tekkristali büyütülebilmektedir.



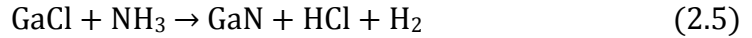
Şekil 2.8 Seçici epitaksiyel büyütmenin şeması. Yalıtkan şerit üzerinde herhangi bir büyüme olmaz iken alttaş üzerinde ilgili malzemenin tek kristali büyütülebilmektedir

VPE tekniği, LPE ile yapılması olanaksız olan çoklu kuantum kuyuları (MQW) ve süperörgüleri (SL) yapılabilir ama 50° genişliğinden daha dar yapıların yapılması aşırı derecede zordur. Ayrıca, ön-ısıtma aşamasında arayüzeysel ayrışmalar ve de tepelik ve puslu (bozuk) oluşumlar söz konusudur (Razeghi, 1989).

Bu ve benzeri dezavantajlar yeni tekniklerin gelişmesine yol açmıştır. Bununla birlikte son zamanlarda, özellikle GaN-tabanlı yarıiletkenleri geliştirmek için VPE'ye başvurulmaktadır. Termodinamik özelliklerinin aşırı uç değerlerde olması nedeniyle külçe kristal büyütme teknikleriyle GaN alttaşı üretilmemektedir. Ancak yüksek basınç ve yüksek sıcaklık teknikleri kullanarak kontrolsüz bir şekilde ve küçük boyutlarda GaN kristalleri büyütülebilir ki bu sonuç ihtiyacı karşılamakta

yetersizdir. Bu yüzden, VPE tekniğini kullanarak safir (Al_2O_3) alttaş üzerine heteroepitaksiyel olarak GaN büyütülmesi tercih edilmektedir.

Normal şartları altında, oldukça yüksek biriktirme oranıyla safir alttaş üzerine GaN filmleri başarılı bir şekilde büyütülebilir (100 mikrondan daha fazla kalınlıklarda). Daha sonrasında, büyütülen bu film tabakası alttaştan sökülerek GaN alttaşı elde edilir. Böyle bir yaklaşım ümitkâr bir teknoloji olarak, günümüzde kullanılmaktadır. VPE ile GaN büyütülmesini kısaca şöyle izah edebiliriz: yüksek sıcaklıkta (~ 850 °C), içinde Ga metali bulunan bir potaya hidrojen klorür gazı gönderilerek GaCl gazı oluşturur. Bu arada, taşıyıcı gaz olarak N_2 kullanarak amonyak (NH_3) piroliz bölgesine aktarılır.

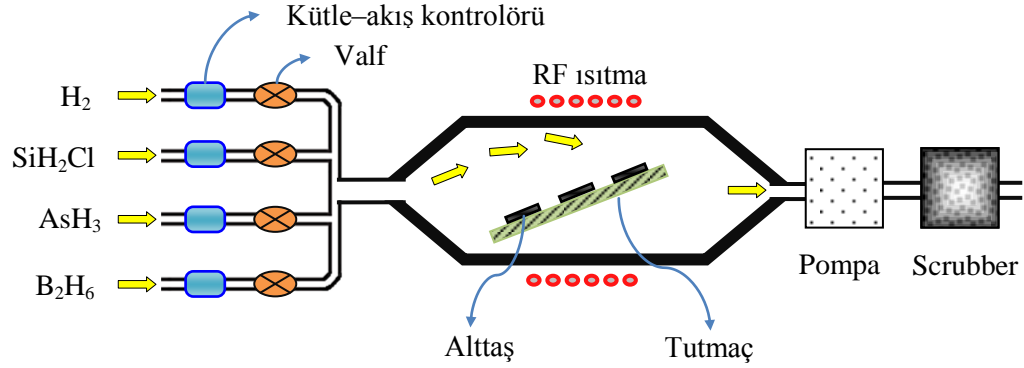


Daha sonra denklem 2.5 gösterildiği gibi, sıcaklığı yaklaşık 1050 °C olan büyütme bölgesindeki alttaş üzerine bu ön kaynaklar püskürtülerek (showerhead-duş başlığı) GaN üretilir (Steiner, 2004).

2.5. Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD)

Aslında bu tekniği VPE başlığı altında da değerlendirebiliriz. Nitekim her iki versiyonda da kullanılan önkaynaklar buhar formdadır. Uçucu moleküller kullanıldığı için, birçok kaynaktan bu iki teknik arasında herhangi bir ayırım yapılmaksızın ele alınmaktadır. Bununla birlikte bu teknikte kullanılan önkaynaklar doğrudan alttaş üzerine biriktirilmeden önce bir takım kimyasal tepkimeler gerçekleştirir. Şekil 2.9'de tipik bir CVD şeması bulunmaktadır. Bu teknikte yaygın olarak silan (SiH_4) veya muhtelif klorosilan ($\text{SiH}_{4-x}\text{Cl}_x$) önkaynakları kullanılarak epitaksiyel silisyum tabakaları büyütülebilir. Oda sıcaklığında silikontetraklorid (SiCl_4) ve triklorosilan (SiHCl_3) sıvı formda iken diklorosilan (SiH_2Cl_2), klorosilan (SiH_3Cl), silan ve disilan (Si_2H_6) ise gaz formundadır (Jackson, 1998). Bunların tümüyle epitaksiyel olarak

silikon tabakaları büyütülebilir. Bu önkaynaklar buhar formda reaktör odasına alınarak ısınan alttaş üzerinde ayrışır.



Şekil 2.9 Tipik bir CVD reaktörünün şeması. Kontrollü miktarlardaki önkaynaklar reaktör odasına transfer edilir. Dış kangallarda RF gücü kullanarak reaktör içindeki tutmaç (susceptor) indükleme ile ısıtılır. Bu ısıyla önkaynakların piroliz (termal ayrışma) reaksiyonları sonucu alttaş üzerinde epitaksiyel tabakalar büyütülür.

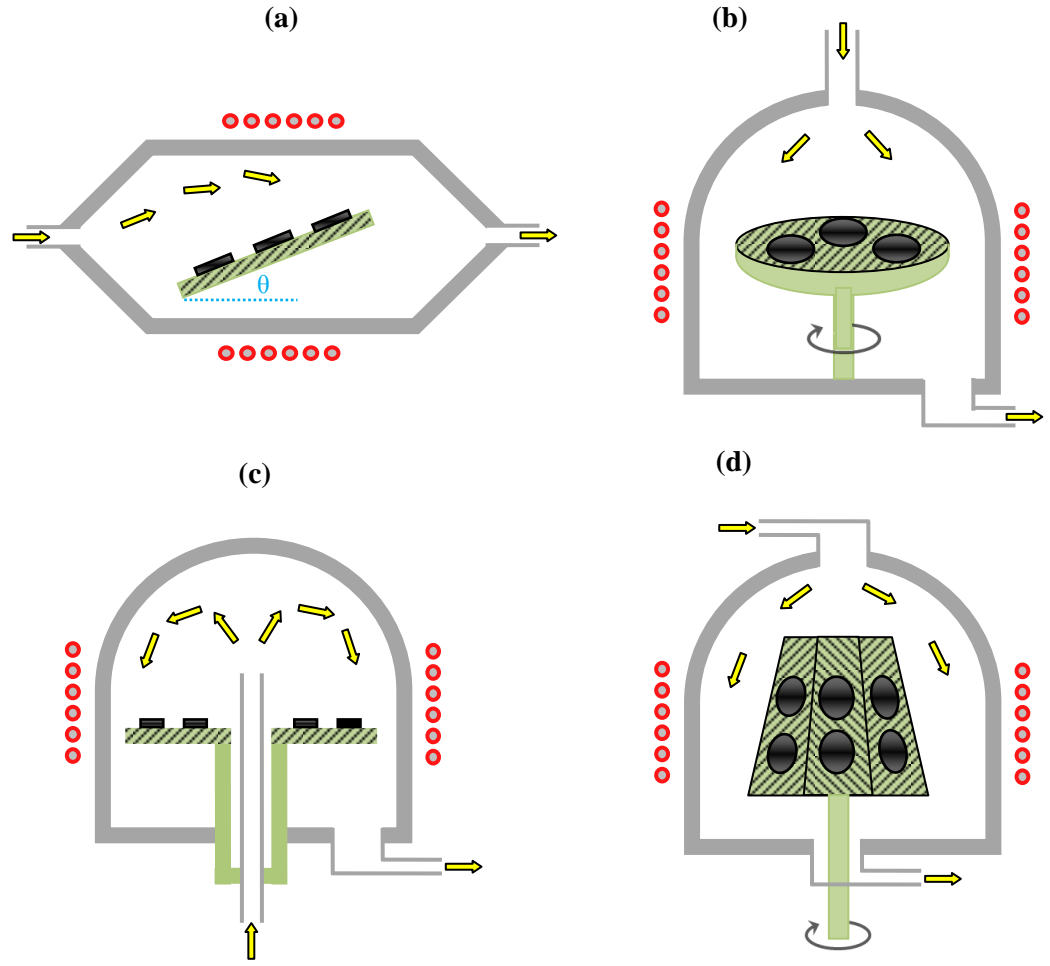
Ayrışma sonrası silikon atomları alttaşa yapışarak kristal örgüye bağlanırken diğer atomlar (hidrojen, klor) yüzeyden uzaklaşırlar. Tepkime sonrası bu artıklar pompa sistemi ile reaktör odasından uzaklaştırılır. Kimyasal olarak parçalanma enerjisi termal, optik ve elektriksel yollardan birisi kullanılarak gerçekleştirilebilir (rezistans ısıtma, radyatif ısıtma, RF ısıtma). Yaygın olarak, arsin (PH_3) ve fosfin (AsH_3) n-tipi katkılama için diboran (B_2H_6) p-tipi katkılama için kullanılan önkaynaklardır. Ayrıca, çeşitli buhar-form teknikleriyle büyütülen bazı yarıiletkenler malzemeler ve ilgili reaktantları Çizelge 2.1 sunulmuştur.

Wafer'lar üzerinde laminar akış düzeni sağlamak için reaktör odasının tasarımı büyük bir önem taşımaktadır. Şekilde 2.10'de kullanılmakta olan bazı CVD reaktör tasarımları verilmiştir.

Çizelge 2.1 Çeşitli CVD teknikleriyle büyütülen bazı yarıiletkenler malzemeler ve ilgili reaktantlar (Jackson, 1998) AP: atmosferik basınç, LP: düşük basınç, UHV: ultra yüksek vakum, MO: metalorganik, OM: organometalik

Yarıiletken	Reaktantlar	Teknik
Si	SiH ₂ Cl ₂ , SiCl ₄ SiH ₄ , Si ₂ H ₆	AP-CVD LP/UHV-CVD
Ge	GeH ₄	AP/LP/UHV-CVD
SiC	SiH ₄ ve C ₃ H ₈	AP-CVD
GaAs	Ga ve AsCl ₃ (CH ₃) ₃ Ga ve AsH ₃	VPE MO-VPE, MO-CVD
InP	(CH ₃) ₃ In ve PH ₃	MO-VPE, vb.
Al _x Ga _{1-x} As	(CH ₃) ₃ Ga, (CH ₃) ₃ Al ve AsH ₃	MO-VPE, vb.
Hg _x Cd _{1-x} Te	Hg, (CH ₃) ₃ Cd ve (C ₃ H ₈) ₂ Te	MO-VPE, vb.
In _x Ga _{1-x} As _y P _{1-y}	(CH ₃) ₃ In, (C ₂ H ₅) ₃ Ga, (C ₄ H ₉) ₃ AsH ₂ ve (C ₄ H ₉) ₃ PH ₂	MO-VPE, vb.

Başlıca keskin heteroyapılar, hassas katkılama profilleri ve kontrollü kalınlıkta epitaksiyel tabakalar büyütme gibi birçok konuda buhar – faz epitaksi teknikleri oldukça avantajlıdır. Ayrıca artan gereksinimleri karşılamak veya iyileştirmek için daha fonksiyonel teknikler geliştirilmektedir.



Şekil 2.10 Yaygın olarak kullanılan bazı CVD reaktörlerinin şeması. Yatay reaktörde (a) alttaş açısı değiştirilmek suretiyle laminar akış en verimli bir şekilde kullanılır. Dikey (b,c) ve Barrel (d) tipi reaktörlerde, alttaşları üzerinde bulandıran platform döndürülerek tekdüze büyüme sağlanır. Dikey reaktör aynı zamanda Pancake reaktör olarak da bilinir. Bu reaktörler yaklaşık olarak 1 Torr ile atmosferik basınç (760 Torr) aralığında işlem yapmaktadır. Ayrıca LPCVD reaktörlerde ise düşük basınçta çalışılarak gaz atomlarının ortalama serbest yolu artırılır. Bu reaktörlerde çeşitli ısıtma teknikleri kullanılabilir.

2.6. Moleküler Demet Epitaksi (MBE)

Moleküler demet epitaksi (MBE) yarıiletken, metal ve hatta yalıtkan malzemelerin epitaksiyel tabakalarını büyütme için kullanılan gelişmiş bir epitaksiyel büyütme tekniğidir. Kısaca; ultra yüksek vakum (UHV) ortamında, uygun bir sıcaklıkta tutulan alttaşın yüzeyinde kaynak materyallerin atomik veya moleküler demetleri yönlendirilerek alttaş üzerinde etkileşmesiyle epitaksiyel tabakalar büyütülmesi şeklinde tanımlayabiliriz (Foxton, 1984; Cho, 1985). Çalışılan basınç değeri öylesine düşüktür ki alttaşa yönlendirilen atomlar veya moleküller birbirleriyle çarpışmadan yani bir demet halinde yoluna devam ederler. Tarihsel olarak incelersek 1958'de Gunther çoklu demet kullanarak III-V materyallerini cam alttaş üzerinde polikristal formda büyütmüştür. Daha sonra 1968'de Davey, Pankey ve Arthur MBE ile tekkristal GaAs filmler büyütmüşlerdir (Razeghi, 1989).

Kullanılan önkaynakların tabiatına bağlı olarak farklı isimler altında değişik MBE türleri mevcuttur. Ön kaynağın katı, gaz ve metalorganik olmasına göre sırayla katı kaynaklı (SSMBE), gaz kaynaklı (GSMBE) ve metalorganik kaynaklı (MOMBE) şeklinde üç temel MBE türü bulunmaktadır.

MBE sisteminde elektron ile buharlaştırma (e-beam evaporation), cracker ve efüzyon hücreleri ile materyallerin atomik/moleküler demetler haline gelmesi sağlanır. Özellikle efüzyon hücreleri (Knudsen hücresi) bu teknikte önemli bir yere sahiptir. Bu hücrelerde, filimi büyütmede kullanılan moleküler veya atomik demetler üretilir. Bu hücreler birbirinden bağımsız olarak işlem yapabilmektedir. SSMBE'de katı önkaynak efüzyon hücresine konarak erime noktasının üst seviyelerine kadar ısıtılır. Bu şekilde, termoiyonik salınım yoluyla önkaynak vakum odasına aktarılır. Demet akışı buhar basıncının bir fonksiyonudur dolayısıyla sıcaklık değerini ayarlayarak arzulan seviye elde edilir. Gaz kullanan sistemlerde moleküler demet akışı kütle akış kontrolörü kullanarak ayarlanır. Son olarak, metalorganik önkaynaklar ise ya sıvı formdadır ya da uygun bir buhar basıncındaki katılardır. İnert

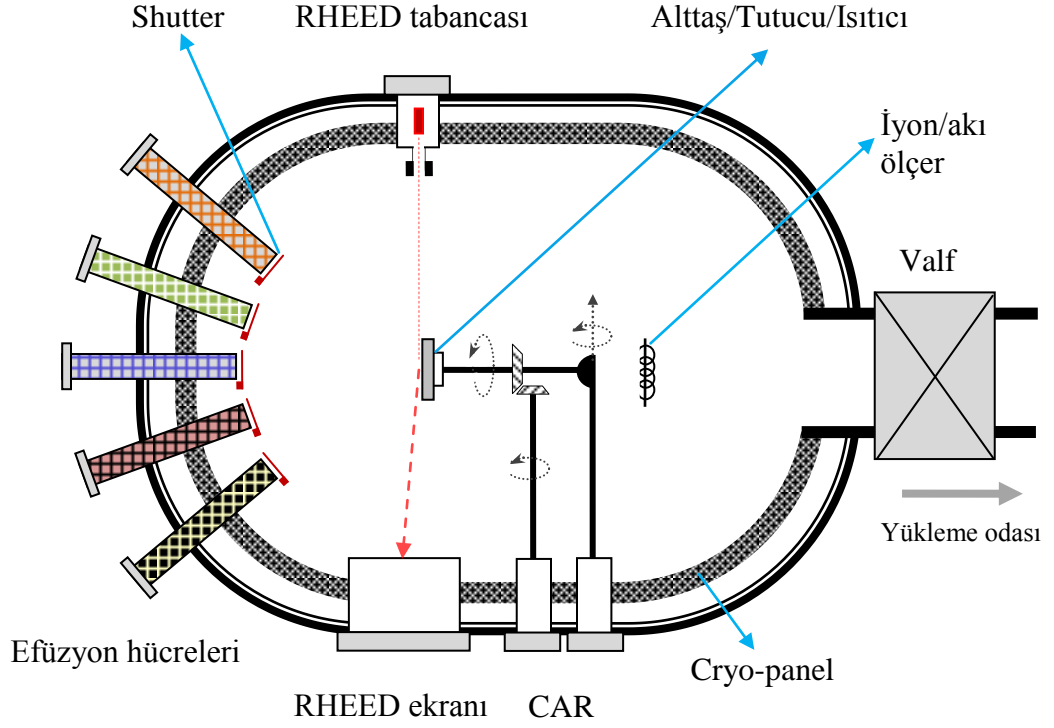
bir taşıyıcı gaz ile bu metalorganik malzemelerin moleküler demet akısı kontrol edilebilir (Steiner, 2004).

Efüzyon hücresi ile alttaş arasında özel dizayn edilmiş bilgisayar kontrollü kapaklar (*shutter*) bulunmaktadır. Bu kapaklar hassas bir şekilde moleküler demet akışının anahtarlanmasını sağlarlar. Bu özelliğinden dolayı, yani akının hassas bir şekilde kontrol edilmesinden dolayı büyütülen epitaksiyel tabakaların kalınlığı ve kompozisyonu kolaylıkla arzulanan seviyelere getirilebilir. Böylece MBE ile ince filmlerden oluşan heteroyapılar çok hassas bir şekilde elde edebilmektedir.

Büyütme, saniyede tek-tabaka gibi oldukça düşük bir hızda gerçekleşir. Örneğin; 1 mikron kalınlığındaki epitaksiyel tabaka takriben 1 saat sürmektedir (Jackson, 2004). Bu durum dezavantaj gibi gözükse de aslında pekte öyle değildir. Zira bu yavaşlık, malzemenin kompozisyonuna ani müdahaleleri mümkün kılar. Bu şekilde yüksek kalitede keskin geçişli heteroyapılar büyütülebilir.

Uygun şartlar altında, atom veya molekül demeti alttaşa ulaşacaktır. Sıcak alttaş ile gelen atomik demet tepkimeye girerek epitaksiyel tabakalar büyür. Büyütülen film; alttaş sıcaklığı, demet akılarının oranı, alttaş yüzeyinin saflığı gibi bazı kontrol edilebilir parametrelere bağlıdır. Büyüyen tabakanın kalınlığı, kompozisyonu ve katkılama seviyesi atomik demet akılarının kontrol edilmesiyle çok hassas bir şekilde ayarlanır. Bu esnada kinetik reaksiyonların ilerlemesi için alttaş sıcaklığı son derece kritik öneme sahiptir. Eğer sıcaklık yeterli seviyede değilse; alttaş yüzeyine gelen atomlar yüzey üzerinde hareket edebilmeleri için gerekli kinetiği bulamayacaklardır. Bu durum büyütülen yüzeyin pürüzlü olmasına sebebiyet verecektir. Eğer sıcaklık yüksek ise alttaş ile büyütülen tabakalar arasında veya büyümüş tabakalar arasında olumsuz derece iç – difüzyon olacaktır. Bu durumda büyütülen yapı bulanıklaşarak mükemmellikten uzaklaşacaktır. Hatta çok yüksek sıcaklıklar alttaş yüzeyindeki atomların koparılmasına da yol açacaktır. Bu bağlamda,

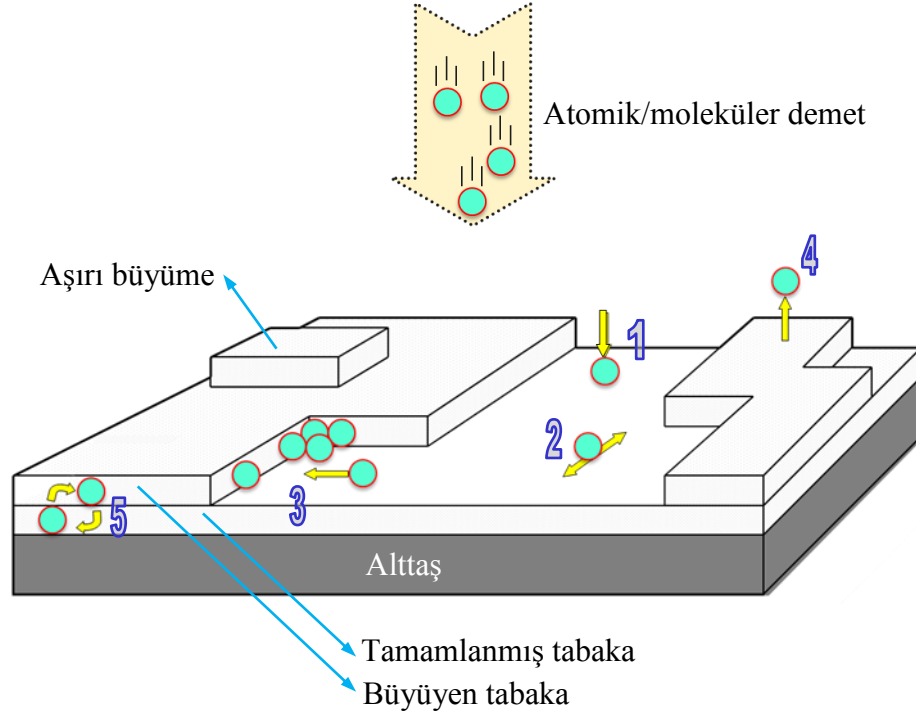
çalışılan sıcaklık seviyesi son derece büyük önem taşımaktadır. Bu seviye belirlenirken genellikle deneysel veriler temel alınır.



Şekil 2.11 Tipik bir MBE sisteminin şeması

Şekil 2.11’de tipik bir MBE sisteminin şeması gösterilmektedir. CAR (*Continual Azimuthal Rotation*) olarak bilinen dönel manyetik tutucuya alttaş monte edilir ve sürekli döndürülerek büyüyen kristalin tekdüze olması amaçlanır. Büyütme odası UHV ortamında çalıştığı için atmosfere açılması hiç istenmeyen bir durumdur. Bu yüzden büyütülecek örnekler özel odalar (yükleme ve hazırlık odası) vasıtasıyla bu odaya aktarılır. Bu hücreler, büyütme odası kadar olmasa da uygun vakum altında tutulmaktadır. Ayrıca bu odalar, uygun bir tarzda ısıtılarak kalıntı gazlardan arındırılır. Herhangi bir kirlenme olmaması için geçiş eklemlerinde kauçuk conta

yerine yumuşak bakır contalar kullanılır. Vakum sistemiyle birlikte sıvı azot soğutmalı cryo-panellerle CO₂ ve H₂O gibi istenmeyen gazlar yoğunlaştırılarak sistemden uzaklaştırılır.



Şekil 2.12 MBE’de epitaksiyel büyütme esnasında gerçekleşen yüzey kinetiklerinin şematik gösterimi. 1: tutunma (adsorpsiyon), 2: yüzeyde difüzyon, 3: örgüye katılma, 4: geri bırakma, 5: iç - difüzyon

MBE tekniğinin diğer epitaksiyel büyütme tekniklerinden ayıran bir diğer önemli farkı da çok yüksek vakum ortamında çalışmasıdır ($10^{-10} - 10^{-11}$ Torr^{*}). Bu yüzden büyütme süreci termodinamik dengeden bağımsız sayılabilir. Büyütmeyi başlat olarak yüzey kinetikleri belirler. Bu özelliği ile daha önce incelediğimiz LPE ve VPE teknikleriyle ayrı düşer. Hatırlanırsa bu tekniklerde büyüme termodinamik

* 1 Torr = 1 mm Hg

denge süreçlerinde gerçekleşmekteydi yani büyüme difüzyon süreçleriyle belirlenmekte idi. MBE tekniğinin en can alıcı noktası kristalleşme bölgesinde büyütülen tabakadaki atomik seviyede meydana gelen süreçlerdir. Bu süreçler Şekil 2.12’de tarif edildiği gibi beş ana adımda özetlenebilir.

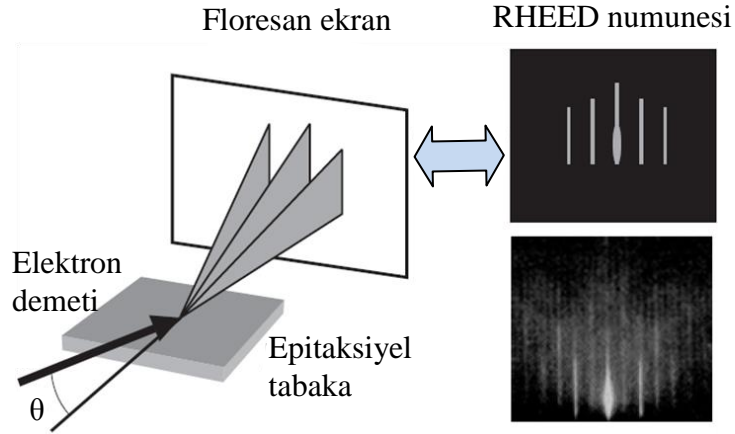
- ✓ Atom veya molekül taneciklerinin alttaş yüzeyine çarparak tutunmaları
- ✓ Tutulan moleküllerin yüzeyde yayılmaları
- ✓ İlgili türlerin alttaşın veya büyüyen tabakanın kristal örgüsüne katılması
- ✓ Kristal örgüsüne yapışmayan taneciklerin termal geri bırakılması
- ✓ Bunlara ilaveten, alttaş ile büyüyen tabaka arasında veya sadece epitaksiyel tabakalar arasında *iç – difüzyon* da meydana gelebilir.

Yeni bir tabaka büyütmeye geçmeden önce, yüzey merkezine vuran taneciklerin kenar kısımlara yayılabilmesi için yeterli mühlet verilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde dağ – vadi benzeri çok pürüzlü yüzeylerin oluşması kaçınılmazdır. Daha kötüsü, konumlarında olmayan atomlar örgü yapısını bozarak kristal kusurları oluştururlar ki büyütme bu şekilde tamamlanırsa kristalde istenmeyen elektriksel özelliklerin bulunması kaçınılmaz olur.

UHV faktörü fazlasıyla masraflı olsa da önemli avantajları da beraberinde getirir. Örneğin, atomlar ve/veya moleküller steril bir ortamda büyüme imkanı bulurlar. Ayrıca efüzyon hücresinden alttaşa salınan demetlerin kat ettiği ortalama serbest yol gayet uzundur. Ortalama serbest yolun uzun olması ilgili atomların alttaşa ulaşmadan önce herhangi bir etkileşim olmasını engeller. Bu, akış düzeninin her zaman laminer tarzda olacağını gösterir. Dolayısıyla UHV ortamında laminer akış düzeni her zaman korunacağı için yani türbülans oluşmayacağı garantilendiği için büyütülen tabakaların homojenliği atomik demet akışına bağımlı değildir. Bu sayede yüksek derecede homojen epitaksiyel tabakaların büyütülmesi gerçekleştirilir. Yine UHV sayesinde, dâhili karakterizasyon (in situ) sistemleriyle büyütme sürecinin kontrol edilebilmesi ve anlık müdahale etme imkânı bulunmaktadır. Yavaş ama

kontrollü bir tarzda atomik tabakalar büyütülürken, bu tabakaların fiziksel ve kimyasal özellikleri dâhili karakterizasyon teknikleriyle izlenerek büyütme gidişatı ayarlanabilir. Bu tekniklerin yardımıyla keskin arayüzeyli heteroyapılar ve katkılama süreçleri hassas bir şekilde gerçekleştirilir. Bu tekniklerin bazılarını şu şekilde sıralayabiliriz:

- ✓ Yansımış yüksek enerjili elektron kırınımı (RHEED)
- ✓ Auger elektron spektroskopisi (AES)
- ✓ X – ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS)
- ✓ Düşük enerjili elektron kırınımı (LEED)
- ✓ İkincil iyon kütle spektrometresi (SIMS)
- ✓ Elipsometre



Şekil 2.13 Çok küçük bir açıyla alttaş yüzeyine yönlendirilen elektron demetinin floresan ekrana yansıtılmasıyla RHEED paternlerinin elde edilmesi. θ açısı genellikle 1° 'den daha dardır (Steiner, 2004).

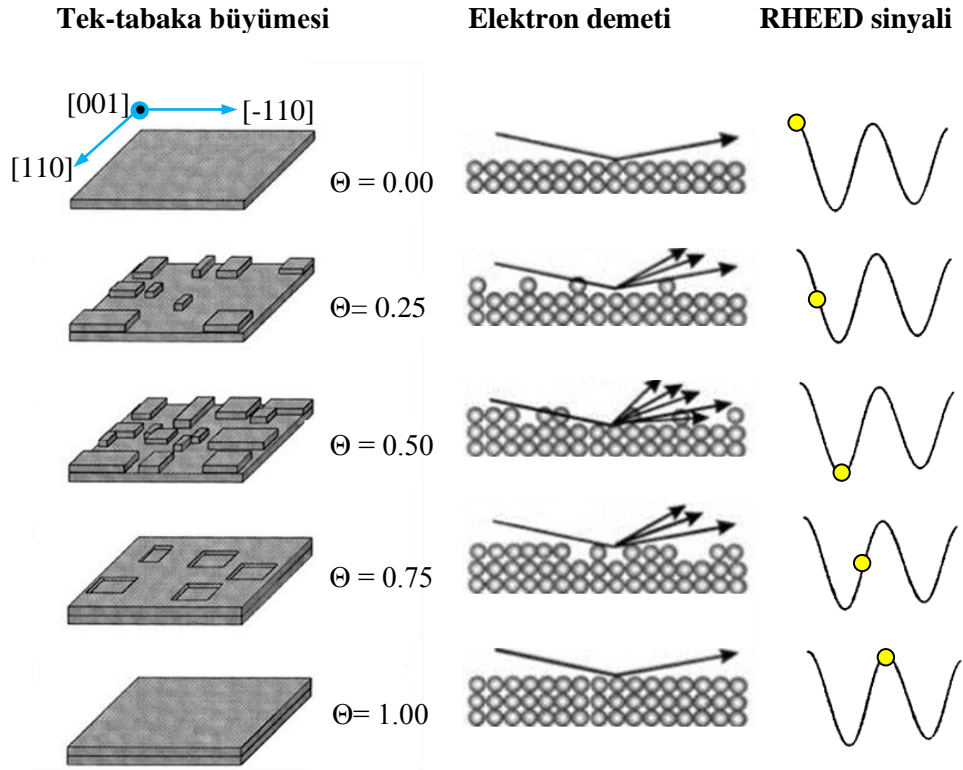
RHEED sisteminde enerjisi 5 – 50 keV aralığındaki elektron demeti Şekil 2.13'de gösterildiği gibi çok küçük bir açıyla alttaş yüzeyine yönlendirilir. Yüzey

üzerinde kırılan elektronlar bir floresan ekrana yansıtılarak RHEED numuneleri elde edilir. Dinamik ve statik olmak üzere iki çeşit RHEED karakterizasyon tipi vardır. Statik RHEED’de yüzeyin atomik yapısı RHEED kırınım numunelerinden faydalanılarak belirlenebilir. Yüzey yapısı gelen elektron demetinin akısının, alttaş sıcaklığının ve üst tabakanın gerginliğinin bir fonksiyonudur. Dinamik RHEED; büyütme süreci boyunca alttaş yüzey pürüzlülüğün değişimine denk olarak merkezi kırınım çizgisinin yoğunluğunun tabakaların tamamlanmasına göre değişmesine dayanmaktadır (*Rheed Intensity Oscilations*).

Epitaksiyel büyütme süreci boyunca, düz bir yüzeyden başlanıldığı için bu çizgi minimumdur. Yeni bir atomik tabaka çekirdeklendikçe epitaksiyel tabakanın kalınlığının artmasıyla bu çizgi de artar. Yüzey çekirdeklenmesi %50 seviyesine ulaştığında pürüzlülük maksimumdur ve bu noktadan itibaren tabaka tamamlandıkça pürüzlülük yani merkezi kırınım çizgisi küçülecektir. Büyütülen tabaka tamamlandığında pürüzlülük minimum olacağı için merkezi kırınım çizgisi ilk haline dönecektir. Yeni bir tabakaya geçildiğinde ise aynı durum tekrarlanacaktır. Bu şekilde merkezi RHEED çizgisi periyodik bir salınım yapacaktır. İşte bu periyodik salınım baz alınarak büyütülen tabakaların kalınlığı ve büyütme süresi belirlenebilir. Bu güçlü teknik, tek bir atomik tabaka kalınlığı hassasiyetinde yanlışsız kalınlık ayarlamasını mümkün kılmıştır. RHEED sisteminden yararlanarak bir tabakanın büyüme kontrolünün nasıl yapıldığı Şekil 2.14’de verilmiştir.

MBE tekniğinde, büyütme aşamasında kullanılan bir diğer önemli teknik Auger elektron spektroskopisidir (AES). Bu teknik ile büyütülen epitaksiyel tabakaların yüzey stokiyometrisi incelenebilir. Epitaksiyel büyütme boyunca katkı atomların yüzey yığılmaları ve yüzeyi oluşturan temel yapı taşı elementlerin bağlı oranlarını değişmesi hakkında bilgi edinilir. Bu tekniğin aslı yüzey elementlerinin Auger etkisinin ölçülmesine dayanmaktadır. Enerjisi 3 – 25 keV aralığındaki bir elektron demeti, yüksek orbitallerde bulunan kor-seviye (core-level) elektronlarına çarparak yüzey atomlarını uyarır. Bu uyarılmanın sonrasında atomlar, tipik enerjili

Auger elektronlarını salarak fazlalık enerjilerini serbest bırakarak kararlı duruma geçerler. Bu salınan enerji ve Auger elektronlarının miktarı yüzey üzerindeki atomlarının konsantrasyonuyla orantılıdır. Bu şekilde büyütülen tabakaların stokiyometresi incelenebilir.



Şekil 2.14 MBE’de tabaka tabaka büyüme modunun şeması (2 boyutlu büyüme). Büyütme süresince tek tabakanın oluşumu ve buna karşılık gelen RHEED titreşimleri. Burada Θ büyütülen tabakanın kaplanan kesrini temsil etmektedir.

Oldukça sofistike kurulumu ve bakımı olmasına rağmen büyütülen film tabakalarında kalınlık, kompozisyon ve katkılama seviyelerinde hassas kontrol sağlaması bu tekniğin tercih sebeplerindendir. MBE tekniğinin diğer epitaksiyel büyütme tekniklerine göre en büyük avantajı: düşük sıcaklıkta çalışabilmesi ve mükemmel kalınlık kontrolü yapabilmesidir. Düşük sıcaklıklarda çalışıldığı için

tabakalar arasında katkıların (dopant) ve yapıtaşı atomların iç difüzyonu azdır. Dolayısıyla keskin arayüzeyli çok-tabakalı yapılar mükemmel bir şekilde büyütülebilir.

MBE sistemi UHV ortamında çalıştığı için fazlasıyla maliyetlidir. Kurulum maliyetine ek olarak, büyütme süresi yavaş olduğundan çalışma maliyeti de fazlasıyla pahalıdır. Ayrıca InP ve InGaAsP gibi fosfor içeren alaşımların büyütülmesi oldukça zordur. Fosforun sistemden geri yansıdığı ve vakum pompalarında toplandığı anlaşılmıştır. Özellikle hem As hem de P içeren alaşımların büyütümü zordur. Ayrıca efüzyon hücrelerinin sınırlı sayıda olması da bir dezavantaj olarak ele alınabilir.

3. METALORGANİK KİMYASAL BUHAR BİRİKTİRME (MOCVD)

3.1. Giriş

Organometalik (veya metalorganik) ve hidrit* kaynaklar ile III-V yarıiletken bileşiklerinin büyütümü ilk kez 1960'da Didchenko tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu büyütme deneyinde trimetilyum (TMIn) ve fosfin (PH₃) kullanılarak InP elde edilmiştir. Daha sonra (1970'ler) Manasevit birçok organometalik kaynaktan çeşitli yarıiletken bileşikler elde etmeyi başarmıştır ve bu tekniğe metalorganik kimyasal buhar biriktirme (*Metal-Organic Chemical Vapor Deposition*) adını vermiştir. MO-CVD veya OM-CVD şeklinde kısaltılabilir. Çalışılan basınç değerini belirtmek amacıyla MOCVD kelimesinin önüne atmosferik basınç için AP veya düşük basınç için LP şeklinde takılar getirilebilir. Aynı zamanda, bazı kaynaklar, metalorganik buhar faz epitaksi (MO-VPE veya OM-VPE) olarak da adlandırmaktadır.

MOCVD, buhar faz epitaksinin gelişmiş bir üst modelidir. VPE ile daha ziyade homoepitaksiyel büyütme mümkün iken bu teknik yüksek kalitede heteroepitaksiyel büyütme için geliştirilmiştir. Bu teknik ile farklı konsantrasyonlu, farklı katkılama düzeyli ve hatta alttaştan farklı bir katkılama tipinde epitaksiyel tabakalar büyütülebilmektedir.

III-V bileşenlerini içeren tipik bir MOCVD sistemde büyütme süreci, genellikle kuvars veya çelik olan bir reaktör içine kontrollü miktarda V grubu hidritleri ile III grubu alkileri alınarak başlatılır. Bu tüpün içinde bir ısıtıcı sistem (genellikle radyo frekansıyla (RF) ısıtılan bir karbon tutmaç (*susceptor*)) ve bunun üzerinde de bir alttaş (*substrate*) bulunmaktadır. Isınan alttaş önkaynakların ayrışmasında katalitik bir etkiye sahiptir ve bu etkiyle gaz fazda ve katı yüzeyde ilgili

* Burada, bir V-grubu elementi ile hidrojenin yapmış olduğu bileşikler kastedilmiştir (Örneğin AsH₃, PH₃, NH₃). Aynı zamanda, Türkçemize hidrür veya hidrat olarak da çevrilmiştir.

türlerin kimyasal reaksiyonları sonucu epitaksiyel tabakaların üretilmesi gerçekleştirilir.

Metalorganik önkaynaklar kullanılarak epitaksiyel büyütme yapabilen bu teknik daha sonra hızlı bir gelişim sürecine girmiştir. Önemli epitaksiyel büyütme teknikleri arasında kendini ispatlayan metalorganik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) tekniği için en büyük problem istenilen saflıkta önkaynakların olmaması idi. Ancak, tekniğin çok yararlı ve hızlı olduğunun görülmesi üzerine oldukça hızlı bir şekilde geliştirilen yüksek saflıkta önkaynaklar sonucunda teknik MBE'ye çok önemli bir alternatif haline gelmiştir. Özellikle yüksek kalitede düşük boyutlu yapıları (LDS) hassas ve hızlı bir şekilde üretebilen MOCVD çok önemli bir epitaksiyel kristal büyütme tekniği olarak AR-GE dünyasında yerini almıştır.

MOCVD sisteminin çalışır durumda tutulabilmesi diğer epitaksiyel büyüme metodlarına (örneğin MBE) göre nispeten daha kolaydır. Ancak büyütme kinetiği çok daha karmaşık olması nedeni ile de daha karmaşık bir kullanıma sahiptir. Kompozisyon geçişleri çok hassas bir şekilde anahtarlanarak (açma/kapama) yüksek kaliteli heteroyapılar, çoklu-kuantum kuyuları (MQW) ve süperörgüler (SL) üretilebilir. Büyütme süreci devam ederken reaktör odasındaki gaz kompozisyonun değişiminde yüksek derecede kontrol imkânı sunduğu için keskin arayüzeyli homojen tabakalar büyüebilme kabiliyeti, düşük arkaplan katkılama yoğunluğu, büyütme hızlarının MBE'den daha büyük olması ve seri üretim tekniklerine yatkın olması gibi bir takım üstünlükler bu tekniği cazip kılan diğer hususlardır. MOCVD ile atomik seviyelerde çok-katmanlı yapılar üretilebilir. MOCVD sistemi tüm bu özellikleriyle, iki boyutlu elektron gazı (2DEG) ve deşik (*hole*) gazı (2DHG) uygulamalarında, çeşitli heteroyapılarda ve diğer çok tabakalı sistemlerde kuantum boyut etkileri (QSE) çalışmalarına imkân sağlamaktadır. Dahası, alaşım kompozisyonunda ve katkılama profilinde ani değişimler yapmak suretiyle yeni sistemlerin büyütülmesine izin vererek "*Bant-aralığı Mühendisliği*"nin gelişmesine de katkıda bulunmaktadır. Sonuç olarak, MOCVD ile sofistike elektronik ve fotonik aygıtlar büyütülebilmektedir.

Ayrıca bu teknikle, örgü parametreleri tamamıyla özdeş olmayan, her bir katmanda yapısal gerginlikler bulunan gergin-tabakalı süperörgüler de büyütülebilmektedir. Bu yapılar güncel aygıtların temelini oluşturmaktadır ve bu alandaki çalışmalar sürekli olarak ilerleme kaydetmektedir.

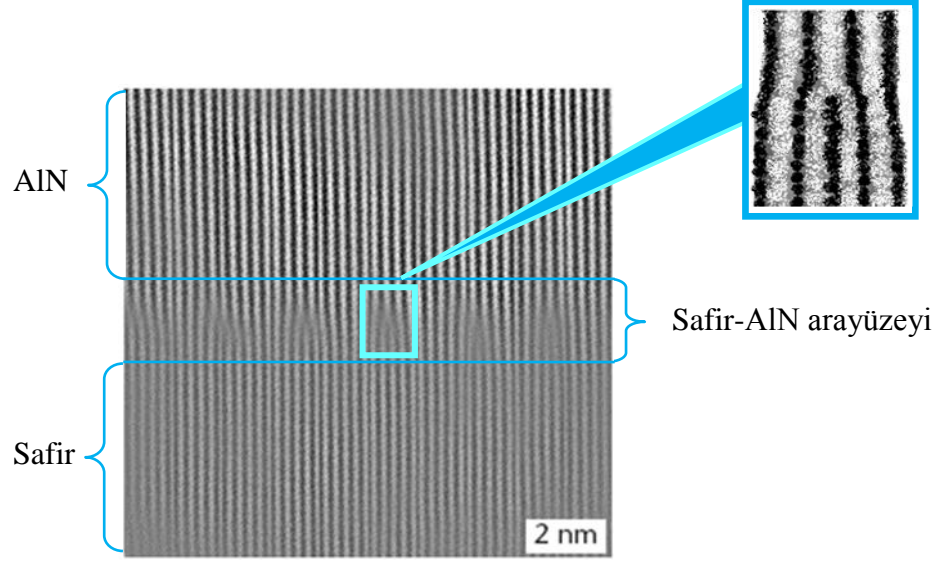
İleride inceleyeceğimiz üzere, MOCVD sistemi kaotik bir çalışma presibine sahiptir ve doğal olarak bazı dezavantajları da içerecektir. Bunlardan en önemlisi oldukça çok gaz moleküllerinin uçuştığı ve MBE'ye oranla çok yüksek termal enerjiye sahip süreçte, elektron kullanarak yapılan yüzey inceleme çalışmalarının hiç biri kullanılamaz. Başka bir ifade ile MOCVD büyütme sistemi MBE sistemi kadar büyütme esnasında kullanabilinen dâhili (*in situ*) elektron dinamiği üzerine kurulu (RHEED, LEED vs.) karakterizasyon tekniklerini kullanamaz. Bu nedenle de büyütülen numunenin kalınlığı, yüzey morfolojisi gibi analizler açısından oldukça fakirdir. Bu önemli açık optik teknikler kullanılarak kapatılmaya çalışılmaktadır. Bu alanda en önemli çalışmalardan bir tanesi yansıma fark spektroskopisidir (*reflectance difference spectroscopy*). Bu teknikte, büyütülen epitaksiyel tabakaya, normale yakın olarak polarize ışık düşürülür ve alt tabaka ile üst tabaka arasındaki yansıma katsayılarının bağıl farkı elde edilir. Bu fark büyütülen tabaka kalınlığının fonksiyonudur ve dolayısıyla tabaka kalınlığı hakkında bilgi sağlamaktadır. Böyle bir teknik, gaz anahtarlamasının hassas bir şekilde kontrol edilmesini mümkün kıldığından MOCVD tekniğiyle yüksek kalitede heteroyapılar ve mükemmel katkılama profilleri gerçekleştirilebilir. Çok güncel diğer bir uygulama ise bir çeşit optik interferometredir. Büyütülen epitaksiyel tabakanın kalınlığını ölçebilmek için büyütülen yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığından daha düşük enerjili bir monokromatik ışık kullanılarak girişim desenleri elde edilir. Bu yöntemi kullanarak MBE sistemindeki dinamik RHEED metoduna benzer bir tarzda anlık atomik tabaka büyütme oranı belirlenebilir. Bu alandaki çalışmalara rağmen henüz in-situ karakterizasyon teknikleri MBE ile kıyaslanacak mertebede değildir, bu alanda çalışmalar devam etmektedir.

MOCVD büyütme tekniğinin dezavantajı sayılabilecek başka bir neden ise; arsin ve fosfin gibi son derece zehirli, yanıcı (flammable), piroforik (alevlenebilir) ve korozif (aşındırıcı) tabiatlı önkaynaklarla ve bunların yan ürünleriyle uğraşmasıdır. Bununla birlikte, son zamanlarda daha güvenli önkaynaklar üretilmiş olsa da hâlâ istenilen güvenlik seviyesine ulaşılmış değildir. Bu yüzden, arsin ve fosfin gibi tehlikeli kaynakları kullanılırken, operatörleri emniyete almak için ve bu toksitlerin çevreye salınımını önlemek için oldukça pahalı ve çok hassas cihazların kullanılması zorunludur.

MOCVD tekniğinin bir diğer dezavantajı ise çalışma sıcaklığının oldukça yüksek olmasıdır. Büyütmenin gerçekleştirilebilmesi için molekülleri ayrıştırmak (piroliz) gerekir. Bunun için alttaşın yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılması gerekir. Bu ise büyütülen yapıda bozulmalara sebebiyet verebilmektedir. Bazen, yüksek ve dengesiz sıcaklıklar katkılanmış bir yapıdaki katkı atomlarının (dopant) veya bir heteroyapıdaki yarıiletken türlerinin olumsuz derecede birbiriyle karışmasına neden olur. Hatta bu dengesiz sıcaklıklar alttaşın yapı atomlarının bile büyütülen tabakalara istenmeden de olsa karışmasına yol açar. Bu durumlar yapının tekrar düzenlenmesine yol açtığı için hedeflenen katkılama seviyesini ve kompozisyon profilini mükemmellikten uzaklaştırır. Bu nedenle bu teknikte operatörün becerisi ve deneysel tecrübesi çok önemlidir.

Bu istenmeyen özelliklerine rağmen MOCVD tekniğini ile yüksek kaliteli tabakalar büyütebilme üstünlüğü sadece örgü uyumlu yapılarda olmayıp aynı zamanda III–Nitrit tipi örgü-uyumsuz yapılarda da mümkündür bu ise oldukça önemli bir avantajdır. Örneğin %13'lük bir örgü uyumsuzluğu olmasına rağmen safir (Al_2O_3) alttaş üzerine epitaksiyel AlN tabakaları başarıyla büyütülmüştür. Şekil 3.1'de bu büyütmenin TEM (geçirmeli elektron mikroskobu) resmi verilmektedir (Steiner, 2004). Safir ile AlN arasındaki büyük örgü uyumsuzluğu, yaklaşık tek tabaka kalınlığında dislokasyonlu bir arayüzeye neden olur. Bu yüzey üzerine büyütülen AlN tabakalarının artık kendi örgü parametresiyle büyüdüğü varsayılır. Bu yapılar

oldukça revaçta olan yüksek performanslı başta elektronik ve optoelektronik aygıtlar olmak üzere birçok yarıiletken aygıtın temelini oluşturmaktadır



Şekil 3.1 MOCVD ile safir alttaş üzerine AIN büyümesinin yüksek çözünürlüklü TEM resmi. Bu yapının örgü uyumsuzluğu büyük olduğu için yaklaşık tek tabaka kalınlığında dislokasyonlu bir arayüzeyden sonra AIN tabakalarının kendi örgü parametresiyle büyüdüğü varsayılır (Steiner, 2004).

3.2. MOCVD Sistemi

Metalorganik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) modern aygıtların epitaksiyel büyütülmesinde yaygın olarak kullanılan önemli bir tekniktir. Özellikle III – V yarıiletken bileşikleriyle yüksek kaliteli epitaksiyel tabakalar, keskin arayüzeyler ve birkaç atom kalınlığında çok tabakalı yapılar üretebilmedeki avantajları bakımından kendini kanıtlamış önemli bir epitaksiyel büyütme tekniğidir.

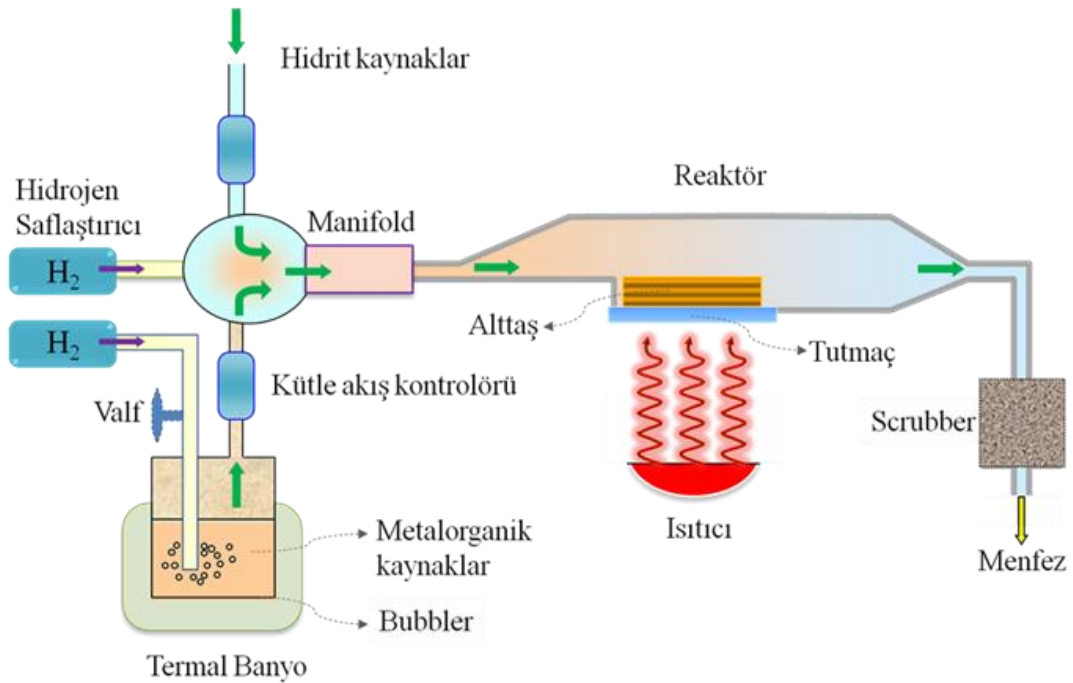
Çalışma prensibi, genellikle kuvarstan veya çelikten olan bir reaktör odasının içinde, tipik olarak III grubu elementlerinin alkileri ile V grubu elementlerinin hidritleri biriktirme bölgesine taşınarak burada piroliz reaksiyonlar sonucu alttaş üzerine birikmesi sağlanır. Alttaş, ısıtılan bir tutmaç üzerine yerleştirilmiştir. Tutmacın ısıtılması, önkaynakların ayrışmasında katalitik bir etkisi sağlayarak sıcak yüzey üzerinde yarıiletken kristal büyümesi gerçekleşir. VPE'nin aksine, MOCVD sisteminde genellikle alttaş önkaynaklardan daha sıcaktır. Tipik bir MOCVD sistemini dört ana başlık altında toplayabiliriz:

1. Gaz işleme sistemi
2. Reaktör odası
3. Hızlı ısıtma sistemi ve
4. Boşaltım sistemi

İleriki konularda sırayla bu başlıklar incelenecektir. Şekil 3.2'de tipik bir MOCVD sisteminin şeması ve Şekil 3.3'de fotoğrafı bulunmaktadır.

Modern yarıiletken teknolojisindeki en önemli uğraşlarından birisi de kaynak materyallerin saflık derecesinin artırılmasıdır. Muhtelif kirleticilerden kaçınmak için kaynak materyallerin saflaştırılmasına yoğun çabalar harcanmaktadır. Önkaynakların çoğu ve taşıyıcı gazlar reaktöre alınmadan önce genellikle saflaştırıcılar ile arındırılırlar.

Alkil (metalorganik) ve hidrit önkaynaklar için kullanılan muhafaza tüpleri, valflar, pompalar, gaz akışını ve karışımını kontrol etmek için gerekli aletler bu sistemi kolaylaştıran başlıca bileşenlerdir. Çoğu önkaynak; *bubbler* (kabarcık haznesi) denilen paslanmaz çelikten olan silindirik şeklindeki tüplerin içinde sıvı formda veya çok iyi bir şekilde ezilmiş (toz haline getirilmiş) katımsı formda muhafaza edilir. Termal banyo takviyeli bubbler'lar içerisinde bulunan kaynağın sıcaklığını çok hassas bir şekilde ayarlayarak kaynağın kısmi basıncının rahatlıkla değiştirilmesine imkân tanır. Hidrojen (H_2), azot (N_2), argon (Ar) ve helyum (He) MOCVD büyütme süreçlerinde yaygın olarak tercih edilen inert (ilgili kaynakla tepkime vermeyen) taşıyıcı gazlardır.



Şekil 3.2 Tipik bir MOCVD sistemin şeması

Taşıyıcı gazların ve önkaynakların kütle akış oranını kontrol etmek için elektronik kütle-akış kontrolörleri kullanılır. Bu kontrolörlerle bubbler'dan çıkan gazların akış oranı rahatlıkla tespit edilerek gerekli değişikliklerin yapılması sağlanır.

Gaz akış miktarını hassas bir şekilde ayarlayan ve büyütme bölgesine ulaşmadan önce homojen bir şekilde istenilen oranlarda gazları karıştıran ve bunları reaksiyon odasına ya da menfeze yönlendiren manifoldun işlevi çok önemlidir.



Şekil 3.3 Aixtron RF 200 MOCVD sistemi

Büyütme sonrasında, tepkimeye girmeyen moleküller ve yan ürünler fazlasıyla zehirli olduğundan çevre güvenliğini sağlamak için özel atık temizleyiciler (*scrubber*) ile nötralize edilir.

Başlıca reaktör odasının tasarımından kaynaklanan bazı problemler büyütme kalitesini azaltmaktadır. Böyle bir problemden sakınmak için reaktör odası dikkatlice tasarlanmalı ve gaz akışı arzulanan düzende olmalıdır. Kararlı, tekrarlanabilir ve homojen büyütme yapabilmek için mümkün olduğu kadar konveksiyonsuz laminer akış düzeni gerekmektedir. Arzulanan bu ideal durum; basınç, sıcaklık, gaz akışı gibi büyütme parametreleriyle ve reaktör odasının kusursuz bir şekilde tasarlanmasıyla sağlanabilir.

Alttaş üzerinde epitaksiyel ince film büyümesi gerçekleşirken başat olarak termodinamik ve kinetik süreç olmak üzere iki temel süreç etkindir. Büyütme aşamalarının tamamında termodinamik süreç etkin olarak belirleyici bir faktör olmasına karşın kinetik süreçler de çeşitli süreçlerin oluşma hızını belirler. Bunlara ek olarak büyüme boyunca, ya gaz fazda homojen olarak ya da alttaş yüzeyinde heterojen olarak gerçekleşen kimyasal reaksiyonların hızı gelmektedir. Şimdi, bu konuları daha detaylıca inceleyelim.

3.2.1. Gaz-İşleme Sistemi

Gaz-işleme sisteminde; alkil ve hidrit kaynaklar, bubbler, termal banyo, saflaştırıcı, valflar, pompalar ve ayrıca gaz akışı ve karışımı için gerekli araçlar bulunur (Şekil 3.4). Alkil ve hidrit kaynaklar Bölüm 3.5'te tartışılacaktır. Yüksek kaliteli tabakalar büyütebilmek için gaz işleme sistemi gayet temiz ve sızdırmaz olmalıdır. Önkaynakların reaktör odasına iletilmeleri için özel paslanmaz çelikten tüpler ve borular kullanılır. Elektronik kütle-akış kontrolleri ve termal banyo sistemleri reaktör odasına giren gazları hassas bir şekilde ayarlama yardımcı olan diğer aletlerdir.

Reaktör içindeki olası kirleticiler istenmeden büyütülen filme girebilir. Yüksek kalitede epitaksiyel tabakalar üretebilmek için büyütülen profile herhangi bir bulaşma olmaması gerekmektedir. Bulaşmalar, çeşitli yollarla olabilir. MOCVD

reaktöründe kullanılan metalorganik materyallerinden herhangi bir bulaşma olmaması için bu materyallerin yüksek derecede saflaştırılmış olması gerekmektedir.

Hidrojen (H_2), azot (N_2) ve helyum (He) en çok kullanılan taşıyıcı gazlardır. Taşıyıcı gazların saf olması büyütülen film tabakalarının kalitesini direk olarak



Şekil 3.4 Tipik bir gaz-işleme sistemi.

etkiler. Bu yüzden taşıyıcı gazlar sisteme verilmeden önce, genellikle özel saflaştırıcılar ile arındırılırlar. Tüp, valf vb. gaz sistemi bileşenlerinden ve gaz tüplerinin kontrolsüz değiştirilmesinden ötürü kirleticiler rahatlıkla sisteme girebilir. Bu yüzden tüp değişimleri, arındırma sistemi bulunduran özel kabinlerde yapılarak kirleticilerin önüne geçilir. Ayrıca gaz sistemi bileşenlerindeki kirleticilerden sakınmak için iç çeperi elektro-cilalanmış özel paslanmaz çelik tüpler yaygın olarak kullanılır. Eldivenli kutu (*glove box*) kullanılarak sistem açık havaya maruz bırakılmadan giriş-çıkış işlemleri yapılır. Bu kutu içerisinde saf azot sirkülasyonu

oluşturularak ve uygun basınçta tutularak istenmeyen gazların sisteme girmesi engellenir. Şekil 3.5’de tipik bir eldivenli kutu bulunmaktadır.

Bazı kriterlere göre taşıyıcı gazın seçimi değişebilir. Yaygın olarak kullanılan hidrojen ve azot gazlarının, muhtelif durumlara göre birbirlerine üstünlükleri vardır. Örneğin; TEIn ile arsin veya fosfin arasında oluşabilecek parazit tepkimeleri önlemek için azota gereksinim vardır. Karbon birikintisini önlemek için de hidrojenli bir ortam gereklidir. TEIn önkaynağı için azot kullanılırken TMIn ve TEGa için ise hidrojen tercih edilir (Razeghi, 1989). Ayrıca, III – Nitrit bileşikleri büyütülürken saf hidrojen, azot veya hidrojen-azot karışımı da kullanılabilir (Lee, 2004).



Şekil 3.5 Eldivenli kutu (*glove box*). Sistem açık havaya maruz bırakılmadan reaktör odasına giriş-çıkış işlemleri burada gerçekleştirilir.

3.2.1.1. Bubbler ve Boru Sistemi

MOCVD ile yüksek saflıkta filmler büyütebilmek için kullanılan parçalar titizlikle seçilmelidir. Önkaynaklar aşırı derece korozif olduklarından dolayı kullanılan araçlar oldukça dayanıklı özel materyallerden yapılmalıdır. Örneğin, çoğu MOCVD

sisteminde, içi elektro-cilalanmış kaynaksız ve paslanmaz çelikten bubbler'lar (kabarık haznesi), borular ve valflar kullanılır. Boru tesisatı, genellikle 1/4 veya 1/8 inçlik paslanmaz elik borulardan oluşur ve bunları bağlamak için Swagelock veya VCR bağlantı parçaları kullanılır (Callahan, 1985).

Alkillerin teslimatı genellikle bubbler'larla sağlanır. Şekil 3.6'da alkil bubbler'ı gösterilmektedir. Bir bubbler'da dip-tp sistemi vardır. Dip-tüpün ağzı, bubbler'ın alt kısmına kadar uzanmaktadır. Dip-tp sistemi, yüksek saflıktaki paladyumdan yapılmıştır. Bu Şekilde, uygun sıcaklıkta, sadece hidrojenin bubbler içine basılması sağlanılır. Hassasça llen taşıyıcı gaz bu dip-tp sistemiyle bubbler'a basılır. Taşıyıcı gazın basılmasıyla bubbler içinde kabarcıklar oluşur (bubbler ismi de bu olaydan gelmektedir). Taşıyıcı gaz bubbler'dan çıkarken ilgili önkaynağı da beraberinde götürür.



Şekil 3.6 Dip – tp girişi bulunduran, özel paslanmaz çelikten yapılan tipik bir önkaynak muhafaza kabı (bubbler). En sağdaki fotoğrafta görüldüğü üzere, faal bir sistemde kullanılan bubbler'lar bir termal banyo içerisindedir. Bu banyo ile bubbler'ın sıcaklığı hassas bir Şekilde ayarlanır.

Genellikle bir bubbler, içindeki maddenin buhar basıncını en verimli bir şekilde muhafaza etmek için bir termostatik banyo ile takviye edilir. Bu termostatik banyolar çok hassas aralıklarda sıcaklık ayarlaması yapabilirler. Her bir gaz akışı, kütle akış kontrolleriyle çok hassas bir şekilde kontrol edilir.

Kaynak materyalin buhar formda kaldığından emin olmak için, bubbler içinden çıkan doymuş buhar bir H_2 akışıyla vakit kaybetmeden seyreltilir. Kaynak türün mol kesri dolayısıyla kısmi basıncı bu karışımın içinde daha düşüktür ve bu suretle kaynak türlerin borular içinde yoğunlaşmasının önüne geçilir. Bazı durumlarda valflar, gaz hatları ve diğer aparatlar ısıtılarak takviye edilir. Aksi takdirde, ilgili parçalara kaynak materyalin yoğunlaşması söz konusudur. Eğer yoğunlaşma gerçekleşirse kütle akışını azaltarak büyütmenin kalitesine zarar verebilir. Dikkatlice temizlenmezse bu tortular bir diğer büyütme işlemine kasıtsız olarak katılabilir (*hafıza etkisi*). Dahası, eğer yoğunlaşmaya müdahale edilmezse gaz hattı tamamen kapanarak birikinti bölgesine önkaynakların iletimi gerçekleşemez.

3.2.1.2. Hidrojen Saflaştırıcı

Hidrojen en çok kullanılan taşıyıcı gazdır. İçinde doğal olarak bulunan oksijen ve su buharı hidrojenin saflığını bozmaktadır. Bu safsızlıklar taşıma esnasında kaynak materyale bulaşıp reaktör odasına girerek büyütülen tabakalara girebilir. Böyle bir durumda büyütülen tabakalar arzulanan saflıkta olamaz. Bu durumu önlemek için kullanılan hidrojen saflık düzeyi yüksek olmalıdır.

Piyasadan tipik olarak 99.99% saflığında hidrojen tedarik edilebilir. Ama bu seviye yüksek kaliteli yarıiletken büyütme için kifayetsizdir. İlgili şirketler yeterince saf hidrojen sağlayabilirler ama oldukça pahalı olduğu için genellikle hidrojen saflaştırıcı kullanmak tercih edilir.

Hidrojen saflaştırma işlemi kabaca şu şekildedir: Fabrikadan alınan hidrojen gazı, özel bir kabın içerisindeki paladyum alaşımli tüpten geçirilir. 400-425 °C

sıcaklığında tutulan tüpten sadece hidrojen difüzyon ederken diğer elementler engellenir. Bu suretle ultra-saf hidrojen gazı sisteme verilmeye hazır duruma getirilir.

3.2.1.3. Termal Banyo

MOCVD sisteminde kullanılacak tipik bir metalorganik kaynak bubbler denilen paslanmaz çelikten yapılan silindir tüp içinde bulunur. Bubbler'ın sıcaklığı kontrol edilerek kaynak materyalin buhar basıncı hassas bir şekilde düzenlenebilir. $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$ aralığında veya daha küçük hassasiyetlerde sıcaklık ayarlaması yapabilen termal banyolar mevcuttur.

Kaynak materyalin buhar basıncını istenilen seviyede tutmak için termal banyolar kullanılması kaçınılmazdır. Eğer bubbler içindeki materyal katı formda ise taşıyıcı gaz kaynak materyale nüfuz edemez veya çok uçucu ise reaktör odasına gereğinden fazla kaynak materyal taşınmasına sebebiyet vererek tekdüze olmayan tabakaların büyümesine yol açar ki bu her iki durumun olması da istenemez.

Bubblerden çıkan gazların miktarını ayarlamak için elektronik kütle akış kontrolörleri kullanılır. Bu kontrolörlerle kaynak materyalinin sadece belirli miktarda reaktör odasına iletimi sağlanır.

3.2.1.4. Elektronik Kütle-Akış Kontrolörleri

Kütle akış kontrolleriyle hatasız ve güvenilir bir şekilde gazların kütle akış oranı ölçülür ve/veya ayarlanır. Bu elektronik sistemler gazların sahip olduğu molar özgül ısıya duyarlı olacak şekilde tasarlanmıştır. Akış kontrolleri kapalı devre kontrol sistemine sahip olup, sistem cihazdan çıkan gaz akışının kütle oranı ölçer, bu ölçümü dış komutla karşılaştırır ve gerekli valf ayarlaması yaparak kütle akışını arzulanan seviyeye getirir.

Şekil 3.7’de gösterildiği gibi akış sensörü, ince duvarlı kılcal bir borunun dış çeperinde bulunan iki adet “kendinden ısınmalı dirençli termometre” den oluşur. Bobinler düzenli akımla beslenir ve bir köprü devreye bağlıdır. Bobinlerde güç harcamasıyla üretilen ısı tüpün sıcaklığını artırır. Sıcaklık tüp içinde düzgün olarak dağılıncaya dek akış olmaz. Tüpteki akış arttıkça üst bobinden alt bobine doğru bir ısı aktarımı olacaktır. Bu şekilde, oluşan bir sıcaklık farklılığı yani bir direnç farklılığı tüpten çıkan gazın kütle akış hızıyla doğrudan orantılıdır. Köprü çıkışı, direnç farklılığının doğrudan bir fonksiyonudur. DC voltajı değiştirerek akış oranı ayarlanır.



Şekil 3.7 Elektronik kütle-akış kontrolörü.

Kütle-akış kontrolörlerinde dikkat edilecek bir diğer önemli husus da ‘gaz çevrim faktörü’ dür. Farklı gazlar farklı kütlelere sahip olduğu için doğru akış oranı elde etmek için çevrim faktörü kullanılır. Normal olarak akış-metreler azota göre kalibre edilmiştir. Dönüşüm faktörü tablosu kullanılarak farklı bir gazın gerçek akışı hesaplanabilir.

Elektronik kütle-akış kontrolörleriyle MOCVD tekniği diğer teknikleri geride bırakmıştır. Bu sistemle, önkaynakların akışını hassas bir şekilde ayarlayarak keskin arayüze sahip yüksek kalitede heteroyapıların büyütülmesi sağlanmaktadır.

3.2.1.5. Manifold (Dağıtıcı)

Yarıiletken bileşiklerin büyütülmesinde dikkat gerektiren bir diğer önemli etken gaz karışımının dikkatlice düzenlenmesidir. Temiz, sızdırmaz ve paslanmaz çelikten olan gaz karışım sistemi, büyütme bölgesine ulaşmadan önce metalorganik ve hidrit kaynakların düzgünce karışmasını sağlar. Kuantum kuyusu, süperörgü gibi yapıların büyütülmesinde ve bazı katkı (dopant) kaynaklarıyla ilgili hafıza etkilerinin giderilmesinde gaz karışım manifoldunun fonksiyonları hayatidir. Gaz karışım manifoldu, gaz akışını reaktör odasına veya menfeze yönlendirmede kullanılır (Şekil 3.8). Gaz işleme manifoldu bilgisayar tarafından açılıp kapatılan hava-basınç kontrollü valflara sahiptir.



Şekil 3.8 Manifold sistemi. Gaz karışımı burada ayarlanarak reaktör odasına sevk edilir.

Gaz akışını oluşturan temel bileşenlerin ön-tepkimeye girmesini önlemek oldukça büyük bir önem arz etmektedir. Uygun taşıyıcı gaz seçimiyle ön-tepkime

olmaksızın gazlar reaktör odasına aktarılır. Reaktör tasarımı, gazların reaktöre ayrı ayrı girmesi üzerinde odaklanmıştır. Isınan alttaşa yakın bir noktada alkil ve hidrit kaynakların, gaz karıştırıcılarla homojen bir şekilde karıştırılması oldukça önemlidir.

Gaz akışı üç-yollu valfler kullanılarak reaktörün içine ya da menfeze gönderilir. Her bir işlemde, akış hızını ayarlamak için; önce, kaynak akış menfeze yönlendirilir ve akış oranı arzulanan seviyeye getirilir daha sonra reaktör içine yönlendirilir.

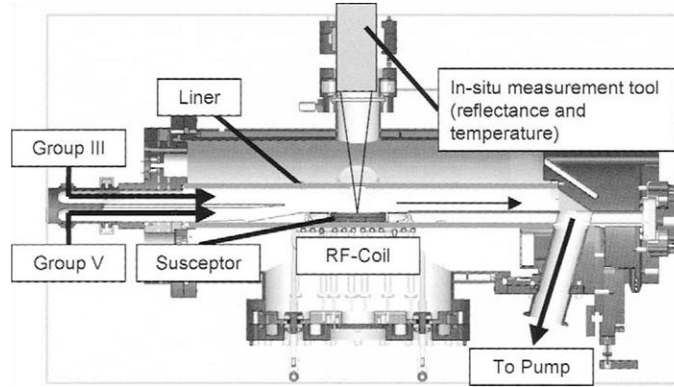
Gaz fazda kararlı bir şekilde kalamayan materyaller kullanılırken çok dikkatli olunmalıdır. Çünkü bu kaynaklar reaktör odasına ulaşmaya dek iletim hattında yoğunlaşabilir. Bu durumu önlemek için iletim hatları ve valfler ekstra olarak ısıtılması gerekir (özellikle As için bu çok önemli bir detaydır). Bu ekstra ısıtma işlemi sistemin kompleksliğini daha da artırır. İşte bu yüzden kaynak materyallerin seçimi çok önemlidir (bkz. Bölüm 3.5).

3.2.2. Reaktör Odası

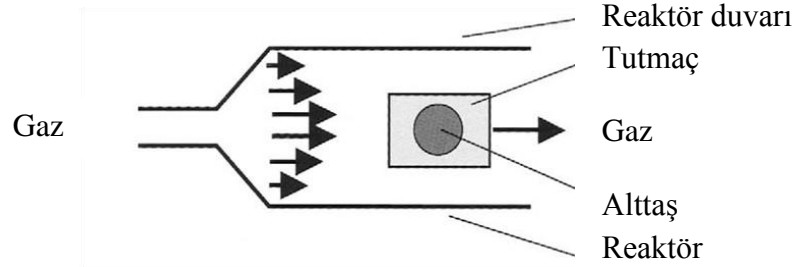
Başlıca reaktör odasının tasarımından kaynaklanan vorteksler (girdaplar) ve ölü hacimler büyütme kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu problemlerin ve istenmeyen reaksiyonların oluşmasını önlemek için reaktör odası dikkatlice tasarlanmalıdır. Kararlı, tekrarlanabilir ve tekdüze büyütme yapabilmek için mümkün olduğu kadar konveksiyonsuz bir ortamda laminar akış düzeni gerekmektedir. Arzulanan bu ideal durum basınç, sıcaklık, gaz akışı gibi büyütme parametreleriyle ve reaktör odasının kusursuz bir şekilde tasarlanmasıyla sağlanabilir. Genellikle bu işlemleri gerçekleştirmek düşük basınçta daha kolaydır.

Dikey ve yatay olmak üzere iki temel reaktör tipi mevcuttur. Dikey tasarımda gaz akışı alttaş yüzeyine diktir. Yatay sürümde ise akış alttaş yüzeyine paraleldir. Yatay reaktör kullanımının temel avantajı; tutmaç açısını hafifçe değiştirmek

suretiyle gaz akışının daha verimli bir şekilde kullanılmasına imkân kılmasıdır. Bu şekilde tekdüze birikintiler elde edileceği gibi aynı zamanda büyütme süresi de azaltılabilir. Her iki tip de düşük ve atmosferik basınçta çalışabilmektedir. İlâveten, her iki tip de RF indüksiyon ısıtma, rezistans ısıtma, radyant ısıtma ve lazer ısıtma gibi farklı tip ısıtma modellerini desteklemektedir. Aşağıda farklı tasarımlarda çalışan bazı reaktör şemaları verilmiştir. Şekil 3.9’ da yatay bir reaktör modeli olan Aixtron RF 200 reaktörünün yapısı ve Şekil 3.10’da da reaktör dizaynının şematiği görülmektedir (Razeghi ve Henini, 2004). Bu reaktörde alttaşın döndürülmesi ve ısıtılması göz önüne alınarak yapılan dinamik akışkan mekaniği temelli modellemeler ile oldukça kararlı gaz akışı sağlandığı gözlenmiştir. Özellikle bu tip reaktörlerde tavan ve yan duvarlarda birikme önemli kirlenmelere sebep olacağı için tüm reaktör çalışma bölgesi dar sayılabilecek bir kuvars tüp içerisinde tutulur ve her bir büyütmeden sonra bu tüp temizlenir.

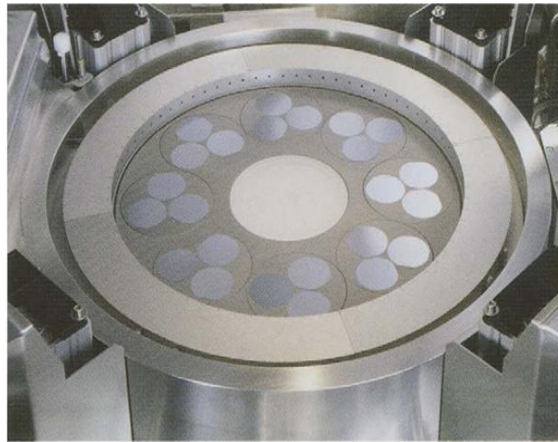


Şekil 3.9 AIX 200/4 RFS reaktör (Razeghi ve Henini, 2004).



Şekil 3.10 Yatay MOCVD reaktörünün üstten görünüşü.

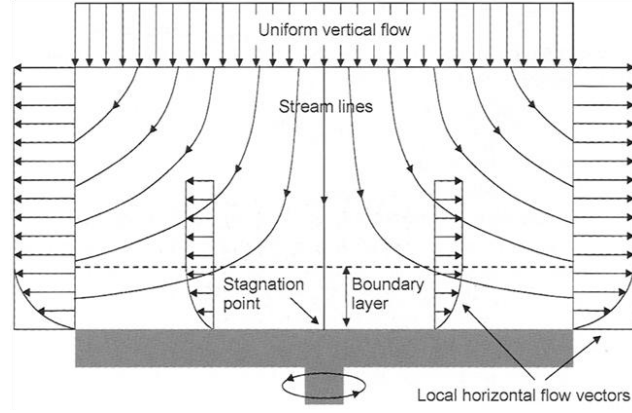
İkinci tip reaktöre bir örnek Şekil 3.11 ile verilen planetary reaktördür. Bu reaktör dikey bir tasarıma sahip olup, çoklu alt taş taşıyıcısının ve her bir alttaşın kendi etrafında dönmesinden dolayı bu ismi almıştır.



Şekil 3.11 AIX 2600G3 HT

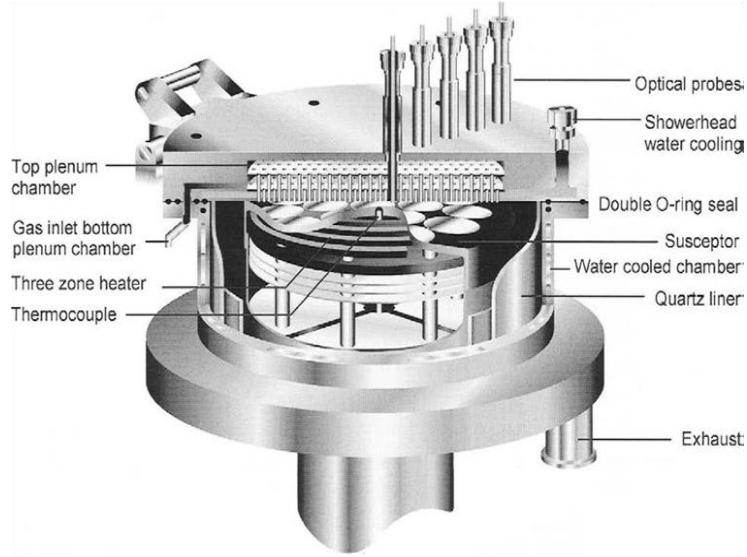
Önemli bir dikey reaktör tasarımı ise bir Amerikan firması olan Veeco'ya aittir. Turbo moleküler dönüş sistemi patenti altında satılan bu reaktör dizaynında oldukça yüksek bir hızla dönen alttaşın, dikey olarak gelen gazları Şekil 3.12 de

detaylıca gösterilen şekilde düzgün yatay akışa çevirmesi prensibine dayanır ve oldukça güzel sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 3.12 Dönen disk (rotating disk) reaktöründeki akış çizgilerinin şeması (Razeghi ve Henini, 2004).

Yaygın olarak kullanılan bir diğer sistem ise yine Alman Aixtron firmasının bir alt grubu olan Thomas Swan grubuna ait Close Coupled Showerhead Reactor (CCS) ismi ile patentli ve detaylı şematığı Şekil 3.13 ve Şekil 3.14 ile verilmiştir (Razeghi ve Henini, 2004). Bu reaktör dizaynında ise taşıyıcı ve önkaynaklar yüzlerce ince delikten alttaşın üzerine püskürtülürler. Her bir gaz bir çok farklı delikten püskürtüldüğünden oldukça düzgün bir büyütme şartı elde edilmiş olur. Söz konusu bu tasarımların her birinin avantaj ve dezavantajları vardır. Örneğin ilk anlatılan reaktörde kuvarsın sık temizlenme gerektirmesi, Veeco'nun reaktöründe turbo moleküler diske dış bir mekanik sistem ile döndürme gerekliliğinden kullanılan manyetik çiftlenimli şaftlar ve CCS sisteminde ise deliklerin tıkanması başlıca göze çarpan problemlerdir. Bu sistemlerin hepsi ticari olarak satılan sistemlerdir ve kullanılan materyal grubuna göre tercih edilmektedirler.

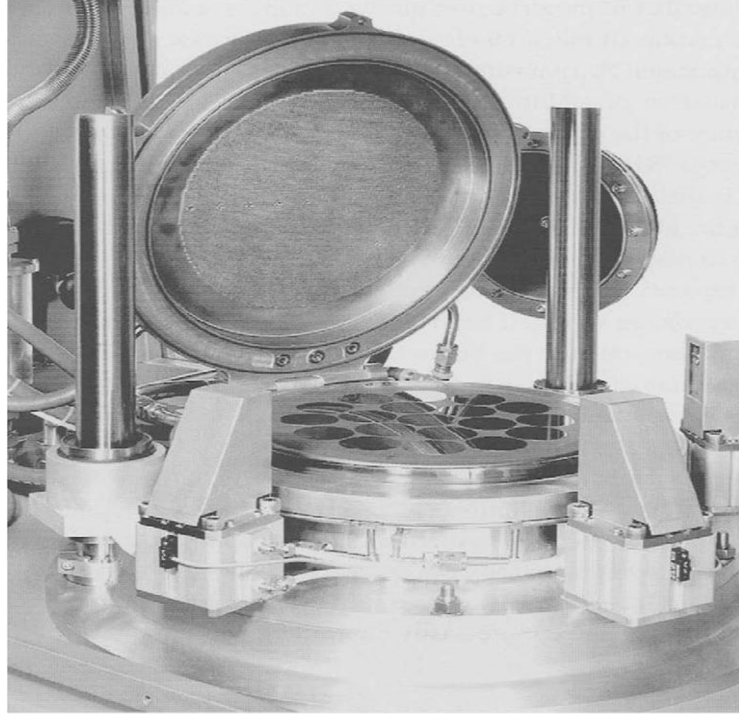


Şekil 3.13 Close-coupled showerhead reaktörünün şeması

Bu sistemler hala geliştirilmekte olup, birçok araştırma ve geliştirme merkezinde birden çok tekniği bir araya getiren ev-yapımı (home-made) MOCVD sistemleri kullanılmaktadır. Örneğin Nakamura'nın kendi tasarımı olan sistemi yatay bir reaktöre eklenen dikey taşıyıcı gazlardan ibarettir.

Tüm bu farklı reaktör tasarımlarında temel amaç tutmacın arkasında oluşabilecek vorteksler ve reaktör girişinin keskin köşelerinde oluşabilecek ölü hacimler çözülmesi bu suretle de düzgün bir gaz akışının sağlanmasıdır. Gaz akışının kontrollü olmadığı, ölü hacimlerin bulunduğu ve ısı gradyanlarının istenilen aralık dışında olduğu bir ortamda keskin arayüzeyle heteroyapılar ve hassas katkılama profilleri büyütme imkânsızdır. Çünkü bu durumda gaz anahtarlanması verimli bir şekilde çalışmaz. Ölü hacimler ve oluşan gaz birikimleri dikkatlice temizlenmezse bu kısımlarda tuzaklanan gazlar diğer büyütme süreçlerine istenmeden bulaşabilir ki buna *hafıza etkisi* denir. Böyle bir problemten sakınmak için reaktör odası dikkatlice tasarlanmalı ve gaz akışı mümkün olduğu kadar konveksiyonsuz bir ortamda laminar düzende olmalıdır. Bu ideal durumu sağlamak için büyütme parametreleri dikkatlice

kontrol edilmeli ve reaktör odası kusursuz bir şekilde tasarlanmalıdır. Tuzaklanmış gazlardan kurtulmak için genellikle düşük basınçta çalışılmalı ve hızlı tahliye (boşaltım ve temizlik) yapılmalıdır.



Şekil 3.14 Close-coupled showerhead reaktörü

3.2.3. Hızlı Isıtma Teknikleri

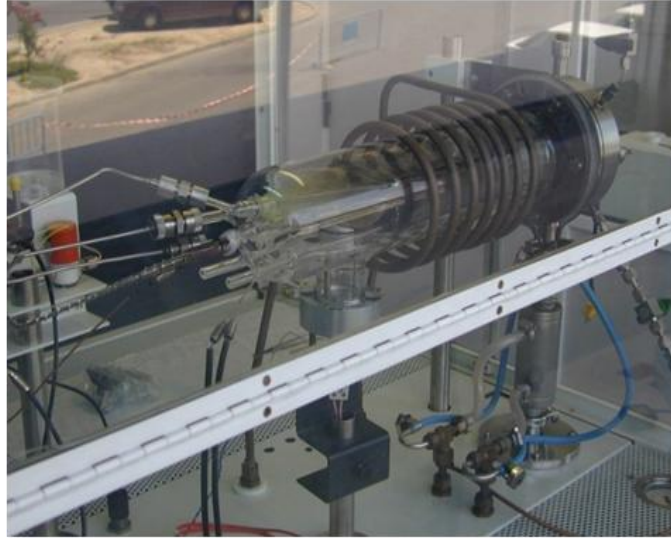
Genellikle kuvars veya paslanmaz çelikten yapılan bir reaktör içinde, üzerinde alttaş olan bir tutmaç bulunmaktadır. Reaksiyon oranını, dolayısıyla tabaka kalınlığını ayarlama, tutmacı kısa zamanda yüksek sıcaklıklara çıkarmak oldukça önemlidir. Büyütülen yapıya göre büyütme sıcaklığı doğal olarak değişiklik göstermektedir. Bazı III – V yarıiletken bileşiklerinin büyütme sıcaklığı ve tipik olarak kullanılan önkaynakları Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 MOCVD tekniğiyle büyütülen bazı III-V bileşiklerinin büyütme sıcaklığı ve ilgili reaktantlar (Steiner, 2004).

Bileşik	Reaktantlar	Büyütme sıcaklığı (°C)
GaAs	TMGa + AsH ₃	650–700
GaP	TMGa + PH ₃	750
GaN	TMGa + NH ₃	1,000–1,050
GaSb	TEGa + TMSb	500–550
AlAs	TMAI + AsH ₃	700
AlN	TMAI + NH ₃	1,100–1,200
InAs	TEIn + AsH ₃	650–700
InP	TEIn + PH ₃	725

Şayet sıcaklık yeterli seviyede değilse; alttaş yüzeyine gelen atomlar yüzey üzerinde hareket edebilmeleri için gerekli kinetiği bulamayacaklardır. Yani yüzeye düşen atomlar hareket edemeyip oldukları yerde birikerek dağ-vadi formunda yüzeyin pürüzlü olmasını tetikleyecek ve sonunda amarf bir yapı elde edilecektir. Şayet sıcaklık çok yüksek ise yapının zarar görmesi kaçınılmazdır. Bu durumda,

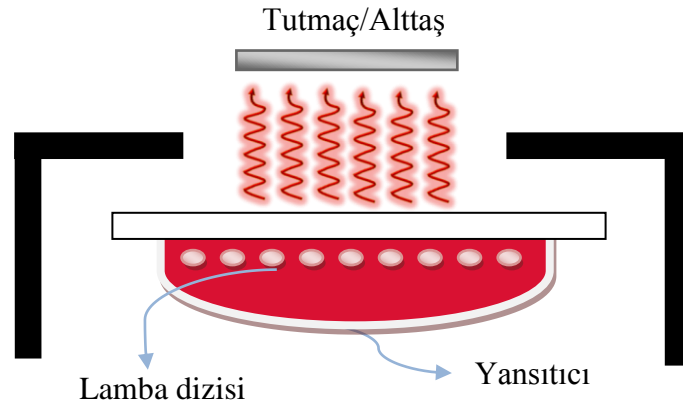
altaştan büyütülen tabakalara ve de büyüyen tabakalar arasında olumsuz derecede iç – difüzyon olacaktır. Yüksek ve dengesiz sıcaklıklar katkılanmış bir yapıdaki katkı atomlarının (dopant) veya bir heteroyapıdaki yarıiletken türlerinin önemli derecede birbiriyle karışmasına neden olur. Bu durumda büyütülen yapı bulanıklaşarak mükemmellikten uzaklaşacaktır. Hatta çok yüksek sıcaklıklar altaş yüzeyindeki atomların koparılmasına yol açacaktır. Bu bağlamda, büyütme sıcaklığı büyük önem taşımaktadır. Bu seviye belirlenirken genellikle deneysel veriler temel alınır.



Şekil 3.15 RF indüksiyon ısıtma. Bu tarz ısıtmada, sisteme dışarıdan indükleme yoluyla ısı verildiği için sistem açık havaya maruz bırakılmaz.

Tutmacın cinsine (grafit veya metal olmasına) ve reaktör dizaynına göre tercih edilen birkaç tipte hızlı ısıtma tekniği mevcuttur. Yaygınca kullanılan ısıtma teknikleri sırayla radyo frekansı indüklemesiyle ısıtma (RF), radyatif (lamba) ısıtma ve rezistans ısıtma yöntemleridir. RF ısıtmada; grafitten veya silisyum karbitten olan tutmaç tipik bir bobinden çıkan RF ile indüklenir (Şekil 3.16). Böyle bir indüksiyon ısıtma işleminde, 1000 °C'den daha büyük bir mertebedeki ısı direk olarak çok kısa bir sürede (1 saniyeden daha az) malzemenin içine dağıtılır. Bu işlem sonucunda

malzemeyi çevreleyen dış alan etkilenmeden, ısı sadece parçanın içinde iletilir. Bu ısıtma yöntemi büyük endüstriyel reaktörlerde kullanılır ve fazlasıyla kompleksdir. Diğer buhar biriktirme tekniklerinin aksine MOCVD tekniğinde alttaş, önkaynaklara nazaran daha sıcak olmalıdır. Materyalin cisine bağlı olarak bu kısmi sıcaklık farkını RF ile sağlamak bazen zordur. Ancak çok hızlı ısıtma ve nerede ise bakım gerektirmeden çalışması pahalı olmasına rağmen bu tekniği ön plana çıkarmaktadır. Ekonomik sebepler ve komplekslikten kaçınmak için çoğu sistemlerde radyatif ısıtma kullanılır.



Şekil 3.16 Radyatif ısıtma sisteminin şeması.

Radyatif ısıtmada; yüksek güçte çalıştırılan volfram halojen lambalardan elde edilen ısı enerjisi radyant enerjiye dönüştürülür. Grafit tutmaç bu radyant enerjiyi soğurur ve tekrardan ısı enerjisine dönüştürür. Şekil 3.17'da böyle bir sistemin şeması sunulmuştur. Bu lambaların sayısı artırılarak daha fazla ve homojen güç sağlanması amaçlanmıştır. Radyatif ısıtmanın temelinde, Denklem (3.1)'de verilen Stefan-Boltzman yasası yatmaktadır.

$$M = \varepsilon \sigma T^4 \quad (3.1)$$

Bu bağıntı sıcaklık ile ışıma enerjisi arasındaki ilişkiyi açıklamaktadır. Burada M ışıma enerjisi, ε yayıcılık (salınım gücü), T sıcaklık, σ ise değeri $5.6697 \times 10^8 \text{ W cm}^{-2} \text{ deg}^{-4}$ olan Stefan sabitidir. Ancak bu yöntemin olumsuz yönü ise, lambaların zaman göre verimlerinin azalmasına bağlı olarak aktardıkları güç değişebilir bu sebeple veya bozulan lambanın değişimi için ise reaktörün açık hava basıncına açılması sistemin kirlenmesine ve bakımının güçlüğüne yol açar.

Rezistans ısıtma metodunda bir metalik (alüminyum veya molibden) tutmaçtan elektrik akımı geçirilmesiyle ısı enerjisi oluşturulur. “Joule heating” olarak da bilinen bu yöntemde de bozulan ısıtıcı elementi değiştirmek bakımı zorlaştırmaktadır ancak verimli ve ucuz bir teknik olarak tercih sebebidir. Bunlara ek olarak, lazer enerjili ısıtma metodu da kullanılabilir. Bu teknik ile üretilen oldukça küçük dalga boyundaki (mor ötesi) foton demetleri hedefe yönlendirilerek ısıtma gerçekleştirilir. CCD kameralar ile ısıtılan örnek gözlenebilir. Bu ısıtma yöntemlerinde sıcaklığı ölçmek için ısı çiftler (thermocouple) veya pirometreler kullanılır.

3.2.4. Boşaltım Sistemi

Boşaltım sistemi, emniyet açısından son derece kritik bir öneme sahiptir. Reaksiyona girmeyen atomların veya yan ürünlerin kısaca istenmeyen tüm maddelerin büyütme odasından uzaklaştırılması zorunludur. Aksi takdirde bu gazlar boşaltım sistemini tıkayabilir. Sistemdeki tıkanmalar reaktörde ani basınç değişikliklerine ve atılacak gazların geri tepmesine neden olur ki bu durumun büyüme kalitesine büyük zarar vereceği kesindir.

Genellikle bu gazlar aşırı derecede zehirli ve yanıcı özellikte oldukları için laboratuvar çalışanlarına ve çevreye büyük zarar verebilir. Bu olasılığı en asgari

seviyeye indirmek için özel cihazlar geliştirilmiştir. Çeşitli scrubber sistemleri, yakma kutuları, partikül filtreleri ve sızıntı detektörleri boşaltım sisteminde kullanılan başlıca aparatlardır.

3.2.4.1. Scrubber sistemi (atık temizleyici)

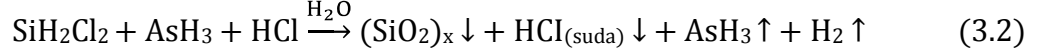
MOCVD sisteminde kullanılan kimyasallar aşırı derece zehirli ve yanıcıdır. Bu maddeleri kontrol altına alabilmek için farklı tiplerde scrubber'lar kullanılabilir. Geçmişte, bu toksitlerin konsantrasyon düzeyi düşürülerek çevreye salınmasının güvenli olduğu sanılmaktaydı. Daha sonralarda, bilim adamları bu yaklaşımın çevre üzerinde yıkıcı etkileri olduğunu rapor ettiler. Bu gelişme, scrubber'ların düzenlenmesini kaçınılmaz kıldı. Şekil 3.17'de gösterilen scrubber'lar kirleticiler çevreye salınmadan onları tuzaklayıp izole edilmesini sağlarlar.



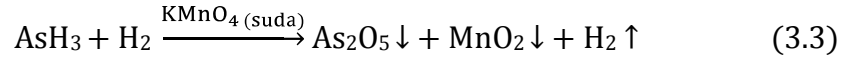
Şekil 3.17 Scrubber sistemi. Tehlikeli gazları yasal olarak belirlenen “güvenli konsantrasyon” sınırlarına kadar seyrelterek, etkisiz hale getirir.

Örnek olarak, üzerinde az miktarda arsin bulunan silikon örneğini ele alalım. Arsini temizlemek için scrubber iki aşamaya sahiptir. Birinci aşamada su, gaz

sisteminden diklorsilani kompleks bir silisyum oksit katısına dönüştürerek gaz sistemden uzaklaştırılırken, HCl ise suda çözünerek nötralleştirilir ve scrubber'dan atılır. Bu reaksiyon aşağıdaki gibi özetlenir.



İkinci aşamada potasyum permanganat gibi bir solüsyonla arsenik oksitlenerek katılaştırılır. Bu suretle güvenli bir şekilde geri dönüşüm gerçekleştirilir. Bu reaksiyon aşağıdaki gibi gerçekleşir.



Toksit gazların arındırılmasında kullanılan solüsyonlar pahalı ve kullanım sonrası imha edilmesi zor olduğundan katı malzeme tabanlı scrubber'lar geliştirilmiştir. Aktif karbon kullanarak MOCVD sisteminden atılan toksitler tuzaklanılır. Ayrıca, potansiyel olarak zararlı gazlar daha güvenli ve imhası daha kolay olabilmesi için oksit-katılara dönüştürülür. Diğer teknikler ile kıyaslandığında katılaştırma tekniği daha üstündür.

3.2.4.2. Yakmakutuları

İstenmeyen tüm maddelerin imhasında kullanılan diğer bir araç da yakmakutularıdır (Şekil 3.18). Yakmakutuları yüksek sıcaklıklarda (~1000°C) tutulan bir fırın içerir. Gazlar burada fırınlanarak zararsız bir hale getirilir. Oluşan maddeler ya kuvars tüplerin içinde yoğunlaştırılır ya da çok yüksek bir hızla yükseltilmiş bacalardan çevreye savrulur. Bu suretle atıklar sistemden uzaklaştırılmış olur.

3.2.4.3. Sızıntı detektörleri

Arsin ve fosfin detektörleri: Zehirli gazların tespit edilmesi herhangi bir MOCVD sisteminde en önemli zorunluluklardan biridir. Çoğu III-V büyütme sistemlerinde

arsin (AsH_3) ve fosfin (PH_3) gibi zehirli gazlar kullanılmaktadır. Arsin ve fosfin gazların varlığını nicel olarak algılamak için özel monitör sistemleri kullanılır. Bu sistemler belli bir gaz için anlık konsantrasyon okuması yaparlar ve daha önceden belirlenmiş olan kritik konsantrasyon düzeyine yaklaşılmışsa sistem anında devreye girerek gaz kabinetlerini kapatarak alarm sinyalleriyle kullanıcıyı bilgilendirilir.



Şekil 3.18 Yakma-kutusu. Tehlikeli gazları fırınlayarak etkisiz hale getirir.

Laboratuvarlarda kullanılan sensörlerin çalışması, basitçe sabit voltaj altında ısıtılmış direnç üzerindeki gerilim düşmesinin okunmasına dayanır. Sensöre gaz girer girmez direnç değişir bu nedenle direnç üzerindeki gerilim de değişir. Bu değişim algılanan gaz konsantrasyonuyla orantılıdır. Sensörler üretim aşamalarında farklı gazlar ve bunların konsantrasyon değerlerine uygun olarak kalibre edilirler. Her bir gazın emniyet seviyeleri, uyarı düzeyleri ve alarm sinyalleri kullanıcılar tarafından ayarlanabilir.

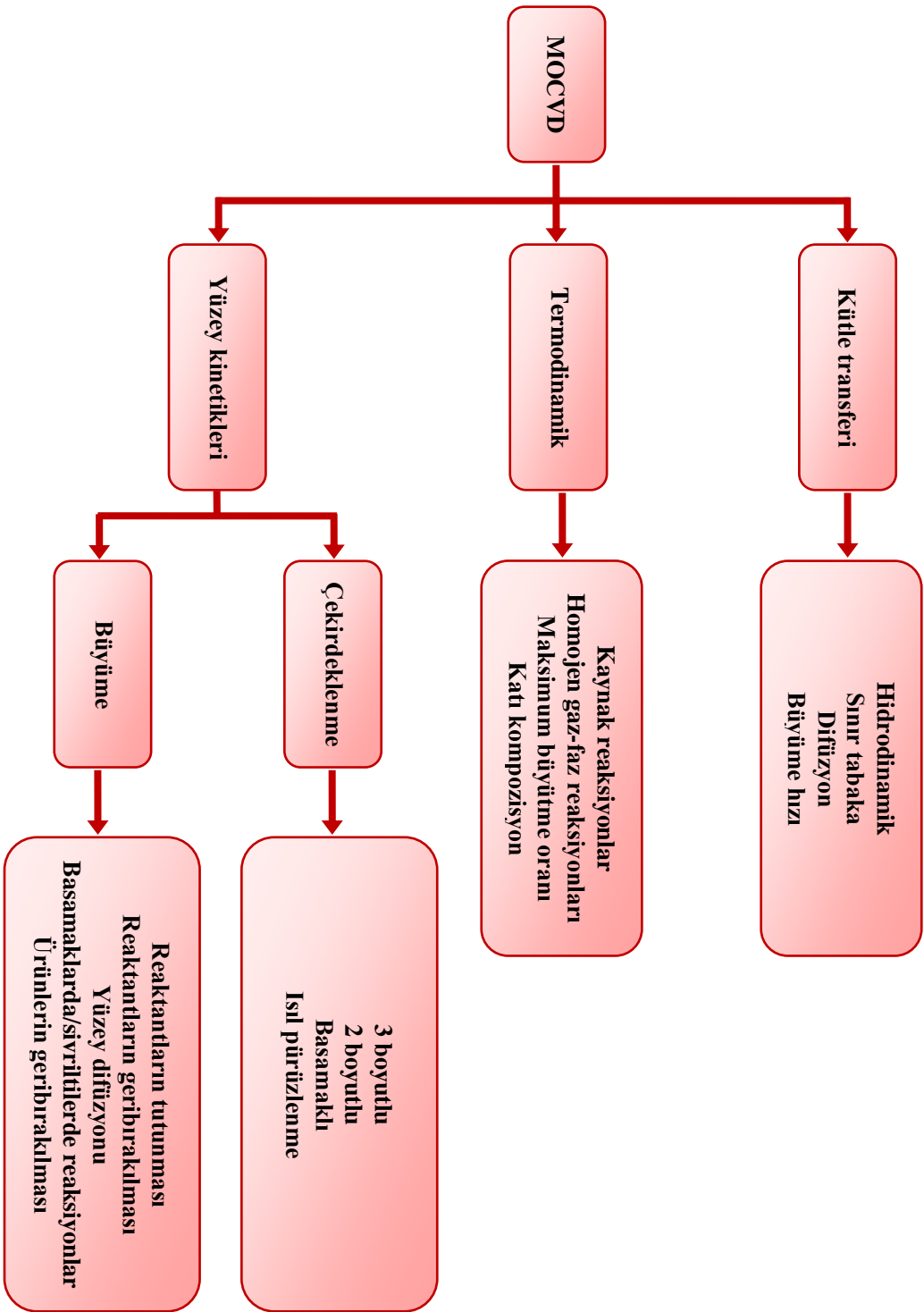
Hidrojen detektörü: Gaz sızıntısının yerini belirlemede yaygın olarak portatif gaz sızıntı detektörleri kullanılır. Bu detektörler sadece H_2 için değil aynı zamanda arsin ve fosfin gibi gazlar için de kullanılır. Bu detektörün çalışması kısaca şöyledir: düşük

güçte çalışan mikro-pompalar kullanılarak ilgili sistem vakum altında tutulmaya çalışılır. Dışarıdan ise şüphelenilen bölgelere H₂ püskürtülür. Ünite içinde H₂ algılandığında sızıntı yeri bulunmuş olur.

3.3. MOCVD Büyütme Mekanizması

Tipik bir MOCVD sisteminde yarıiletken bileşiklerin büyütme süreci kısaca şöyle açıklanabilir: ilkin, ilgili türler biriktirme bölgesine hızlı bir şekilde aktarılır. Bu durumda akış dinamiklerinin kontrollü, akış karışımı, geometrik etkilere göre akışın ayarlanması ve sıcaklık değişimleri süreci etkileyen önemli parametrelerdir. Reaktif türlerin biriktirme odasına taşınması gerçekleştikten sonra difüzyon yoluyla sıcak alttaş yüzeyinde büyüme gerçekleşir. Difüzyonu etkileyen sıcaklık gradyenti ve konsantrasyon profilinin değişimleri büyüme oranını belirleyen önemli parametrelerdir.

Alttaş üzerinde büyütme süreci başat olarak termodinamik ve kinetik süreç olmak üzere iki temel süreçten oluşur. Büyütme aşamalarının tamamında termodinamik süreç etkin olarak belirleyici bir faktör olmasına karşın kinetik süreçler de çeşitli süreçlerin oluşma hızını belirler. Büyütme süreçlerinde bu iki faktöre ek olarak başka faktörlerde vardır. Isınan tutmaç ile sınır tabakası arayüzeyindeki gaz hızları, sıcaklık gradyenti gibi hidrodinamik olaylar ve kütle transferi yukarıdaki iki başat süreçten sonra yer alırlar. Bunlara ek olarak büyüme boyunca, ya gaz fazda homojen olarak ya da alttaş yüzeyinde heterojen olarak gerçekleşen kimyasal reaksiyonların hızı gelmektedir. Bu faktörlerin her biri büyüme aşamasında önemli bir yere sahiptir. MOCVD ile ilgili temel süreçler Şekil 3.19'da ana hatlarıyla gösterilmektedir (Stringfellow, 1985). Büyüme hızı gibi makroskobik bir niceliğin, alttaş sıcaklığı ve önkaynak akış hızı gibi dış parametrelere bağlılığı büyüme mekanizmasının iç yüzünü kavramaya yardımcı olabilmektedir. Bu yüzden deneysel veriler oldukça büyük bir önem taşımaktadır.



Şekil 3.19 MOCVD tekniğine ilişkin temel süreçler (Stringfellow, 1985)

MOCVD sürecinde gerçekleşen kimyasal ayrışmanın gidişatı henüz tam olarak aydınlığa kavuşmuş değildir. Reaksiyonların doğasını kısmi de olsa gaz dinamikleri belirler (tutmaç civarındaki sıcaklık profili, konsantrasyon ve termal gradyentler). Ayrıca, doğal olarak reaksiyonların gidişatını önkaynakların seçimi de etkilemektedir. Şimdi, büyütme sürecini başat olarak belirleyen termodinamik ve kinetik süreçleri ayrı başlıklar altında inceleyelim.

3.3.1. Termodinamik

Termodinamik; bir sistemde meydana gelen kimyasal veya fiziksel dönüşümlerde, enerjinin bir türden başka bir türe dönüşüm miktarlarını düzenleyen bir bilim dalı şeklinde tanımlanabilir. Şurası unutulmamalıdır ki, termodinamik yaklaşım, bir eğilimi ortaya koyar ve tepkime hızı ile ilgili bir öngöründe bulunmaz. Termodinamik; bir kimyasal reaksiyonun gerçekleşip gerçekleşmemesi hakkında ön bilgi sağlamaktadır. Termodinamiğin fonksiyonlarını kullanabilmek için ilgili sistem denge durumunda olmalıdır. Denge durumunu; reaksiyon sonrasında reaktantların ve ürünlerin konsantrasyonlarında herhangi bir değişikliğin olmadığı kararlı durum şeklinde tanımlanabilir. Başka bir deyişle, Gibbs serbest enerjisinin (G) minimum olduğu durumdur. Gibbs serbest enerjinin değişim (ΔG) değeri ve işareti ilgili reaksiyonun olabilirliğinin ve tersinmezliğinin ölçütüdür. Çizelge 3.2’de bazı reaksiyonların serbest enerji değişimleri verilmektedir.

Çizelge 3.2’in ilk iki satırında görüldüğü üzere ΔG eksi (-) işaretlidir ve oldukça düşük bir değerdedir. Bu durum, silanın (SiH_4) oksitlenmesinin ve nitritlenmesinin uygun (*favourable*) bir reaksiyon olduğunu ve tersinmez olduğunu gösterir. İlk ikiye ilaveten üçüncü sıradaki reaksiyon da (-) işaretlidir. Bu reaksiyon enerjetik olarak uygun olmakla birlikte ΔG çok düşük bir değerde olduğu için tersinebilir. Dikkat edilirse, dördüncü ve beşinci sıradaki reaksiyonların ΔG ’leri pozitif işaretli olduğu için oda sıcaklığında gerçekleşmesi termodinamik olarak

mümkün değildir. Bu reaksiyonların gerçekleşmesi için daha yüksek sıcaklıklara gerek duyulur.

Çizelge 3.2 Bazı reaksiyonların serbest enerji değişimleri (Steiner, 2004).

Reaktantlar	Ürünler	ΔG (kJ/mol)
$\text{SiH}_4 + 2\text{O}_2$	$\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	-1307
$2\text{SiH}_4 + 4\text{NH}_3$	$\text{Si}_3\text{N}_4 + 12\text{H}_2$	-742
SiH_4	$\text{Si} + 2\text{H}_2$	-57
$\text{TiCl}_4 + 2\text{NH}_3$	$\text{TiN} + 4\text{HCl} + \text{H}_2$	92
$\text{TiCl}_4 + 2\text{H}_2$	$\text{Ti} + 4\text{HCl}$	287

Buhar-faz kompozisyonları bilinen çok bileşenli bir sistemin katı kompozisyonları hakkında bilgi edinmede termodinamik hesaplamalar oldukça faydalıdır. Ayrıca, farklı sıcaklık ve basınç değerleri için kristal kompozisyonlarını hesaplayarak çok bileşenli bir sistemin faz diyagramlarının elde edilmesinde de oldukça kullanışlıdır. Bir epitaksiyel sürecin büyüme oranının anlaşılmasında da termodinamik hesaplamalar gayet faydalıdır (Razeghi, 1995). Termodinamik hesaplamalar oldukça ayrıntılı olduğu için, temel hesaplamalar üzerinde durulacaktır.

Her şeyden önce termodinamik hesaplamalar denge durumunda bulunan sistemler için yapılır. Reaktöre gaz girişi/çıkışı sürekli olarak devam ettiği için denge durumu sağlamak oldukça zordur. MOCVD büyütme süreci denge durumunda gerçekleşmemesine rağmen, termodinamik hesaplamalar çok bileşenli bir sistemin büyüme hızı ve katı kompozisyonu hakkında ön bilgi verebilir. Gibbs serbest enerjisinin (G) minimum olduğu durum denge durumu olarak tanımlanabilir. Gibbs serbest enerjisi (G), entalpi (H) ve entropi (S) ile aşağıdaki gibi bağlantılıdır.

$$G = H - TS \quad (3.4)$$

Burada T sıcaklıktır. Entalpi

$$H = E + PV \quad (3.5)$$

şeklinde tanımlanır. Burada E iç enerji, P basınç ve V de hacimdir.

A ve B gibi iki sistem dengede ise, bunların toplam Gibbs serbest enerjisinde herhangi bir değişiklik olmaz. Matematiksel olarak

$$\left(\frac{\partial G_i}{\partial n_i}\right)_{T,P,n}^A - \left(\frac{\partial G_i}{\partial n_i}\right)_{T,P,n}^B = 0 \quad (3.6)$$

şeklinde ifade edilir. $\partial G/\partial n$ terimi bir sistemin kimyasal potansiyeli (μ) olarak tanımlanır. Buradaki n_i tek bir bileşenin mol konsantrasyonudur. Herhangi bir tek atomlu ideal gaz sistemi için kimyasal potansiyel şöyle verilir (Razeghi, 1995).

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln \frac{P_i}{P_i^0} \quad (3.7)$$

Burada R gaz sabiti, P_i kısmi basınç, P_i^0 ve μ_i^0 sırasıyla NŞA bir durumun kısmi basıncı ve kimyasal potansiyelidir.

MOCVD büyütme süreci katı-gaz fazda gerçekleştiğinden dolayı ideal bir sistem olarak tanımlanamaz. Bu yüzden yukarıdaki denklemi aynı formda kullanamayız. Şimdi ideal olmayan bir durum için söz konusu denklemi değiştirelim:

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln a_i \quad (3.8)$$

Olsun, burada a_i aktivite katsayısıdır* ve şöyle ifade edilir.

* Standart durumda olmayan bir sistemin serbest enerjisindeki değişimin ölçütü.

$$a_i = \gamma_i x_i \quad (3.9)$$

Buradaki γ_i idealliği bozma faktörüdür (*non-ideality*) ve x_i mol kesridir. Buhar fazı genellikle ideal durumda ele alınır. Çünkü kaynak moleküller oldukça seyreltiktir ve bu durum kaynak moleküllerin birbiriyle etkileşmesini oldukça azaltır. Buhar–katı ve katı–sıvı fazları ideal olmayan sistemlere örnek olarak verilebilir.

Eğer bir sistem dengede değilse, termodinamik sürücü kuvvet sistemin dengeye gelebilmesi için gerekli potansiyel enerji değişimini gerçekleştirir.

$$\Delta\mu = \mu_A - \mu_B \quad (3.10)$$

Bu, epitaksiyel büyüme için sürücü kuvvettir ve maksimum büyüme oranını tayin eder. Sürücü kuvvetin çok büyük olduğu durumda büyüme yüzeyinde pürüzlenmeler; çok küçük olduğunda ise büyüme hızı çok küçük olacaktır.

MOCVD büyütme süreci katı-gaz fazda gerçekleştiğinden dolayı termodinamik hesaplamalarda ideal olmayan sistem bağıntıları kullanılır. Şimdi sadece A ve B moleküllerini içeren basit bir sistemi düşünelim. AA, AB, BB tarzında üç tane en yakın komşu etkileşimi olasıdır. Bu ikili sistemin denge şartı; sistemin Gibbs serbest enerjisinin minimum olmasıdır. Bu durumda karışımın Gibbs serbest enerjisi şöyle yazılır:

$$\Delta G^M = \Delta H^M - T\Delta S^M \quad (3.11)$$

Burada M üst indisi ilgili karışımı temsil eder. Karışımın entropisi

$$\Delta S^M = -R (x \ln x + (1 - x) \ln (1 - x)) \quad (3.12)$$

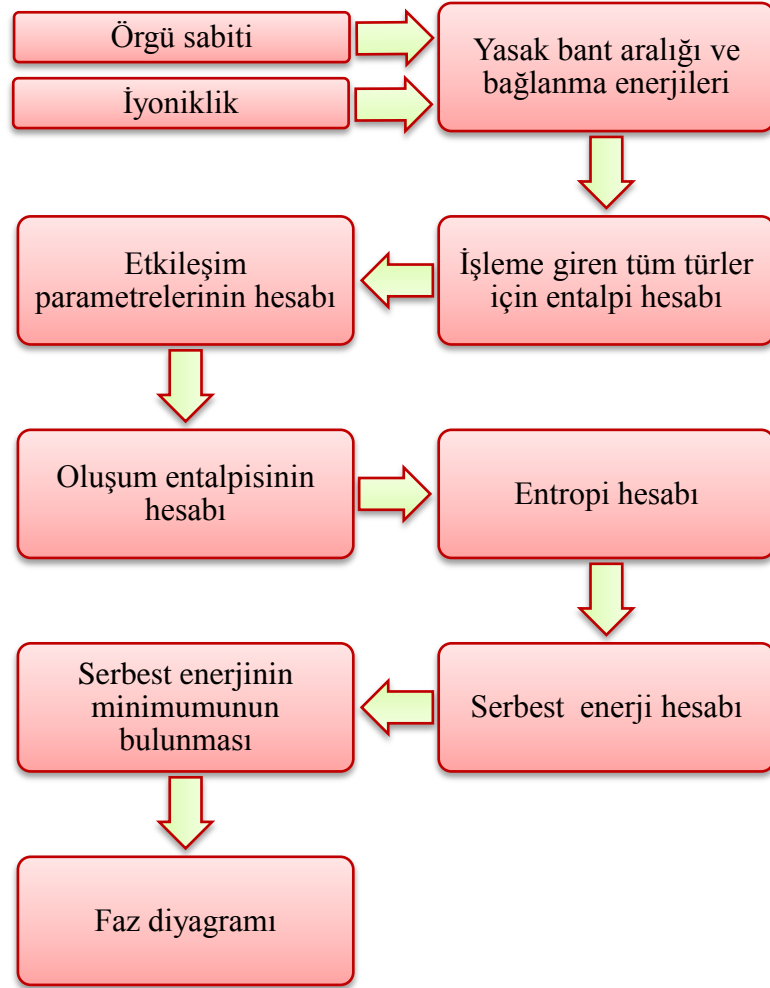
şeklindedir (Kittel ve Kroemer, 1980). Karışımın entalpisini ise

$$\Delta H^M = x(1-x)\Omega \quad (3.13)$$

şeklindedir. Burada x mol kesridir, Ω ise etkileşim parametresidir ve H_{AA} , H_{AB} ve H_{BB} gibi farklı bağlanma enerjilerinin entalpisiyle ilgilidir. Üste verilen son üç denklem, faz diyagramları için temel teşkil eder. Başlıca bu denklem takımıyla faz diyagramları düzenlenir. Ayrıca, herhangi bir faz diyagramı düzenlenirken hangi parametrelere gerek duyulacağına dair fikir edinmek için Şekil 3.20 dikkate alınmalıdır.

Bir faz diyagramı için gerekli olan parametrelerin çoğu zaten literatürde mevcuttur. Dahası faz diyagramlarını elde etmek için SOLGASMIX gibi bazı ticari paket programları da bulunmaktadır. Ayrıca çok-bileşenli birçok sistemin faz diyagramları da literatürde bulunmaktadır. Olası katı kompozisyonlar hakkında bir ön fikir edinebilmek için sıcaklık, kısmi basınç gibi başlangıç büyütme parametreleri faz diyagramları sayesinde elde edilir. Dörtlü $Ga_{1-x}In_xAs_{1-y}P_y$ ve üçlü $GaAs_{1-x}P_x$, $InAs_{1-x}P_x$, $In_{1-x}Ga_xAs$ sistemleri için buhar kompozisyonlarına karşı katı kompozisyonlarının termodinamik analizleri yayınlanmıştır. Genellikle deneysel sonuçlar ile teorik sonuçlar arasında iyi bir uyum elde edilmiştir (Stringfellow, 1985; Razeghi, 1989).

Termodinamik hesaplamalardan öngörülen bir diğer önemli parametre büyütme oranıdır. MOCVD büyütme sürecinde genellikle gerçek büyütme oranı termodinamik hesaplamaların belirlediği orandan çok daha düşüktür. Bunun nedeni yüzey kinetikleridir. Aynı zamanda, büyütme oranını belirlemede hidrodinamikler ve kütle transferi de kritik bir rol oynamaktadır.



Şekil 3.20 Herhangi bir faz diyagramının oluşturulmasına ilişkin parametreler (Razeghi, 1995)

Termodinamik hesaplamalardan elde edilen büyütme oranının temelinde sınırlı-difüzyon sürecinin olduğu varsayılır. Öyleyse gelen atomların akışı büyütme oranıyla doğrudan orantılıdır. Gelen atomların kısmi basınçları ve bu atomların difüzyon katsayıları akıyla bağlantılıdır. Çoğu durumda, bu atomlardan bir tanesi büyütme oranını belirlemede daha baskındır. Örneğin; GaAs yapısında As

atomlarının kısmi basınçları Ga atomlarına kıyasla daha büyük olduğundan GaAs büyütme oranının belirlenmesinde Ga atomlarının kısmi basıncı kritiktir.

MOCVD büyütme süreci denge durumunda gerçekleşmediğinden ötürü termodinamik, büyütme aşamasında sadece belirli limitleri belirleyebilir. Büyüme, kaotik bir ortamda meydana geldiği için termodinamik, denge durumuna erişebilmesi için gerekli süre, en düşük enerji düzeyi için takip edilecek adımlar ve başlangıçta sisteme giren gazların son durumda yarıiletken kristaline dönüşmesi esnasında oluşan çeşitli süreçlerin hızları hakkında tek başına detaylı bilgi sağlamada yetersiz kalır. Bu problemlere sadece yüzey kinetikleriyle yaklaşılabılır.

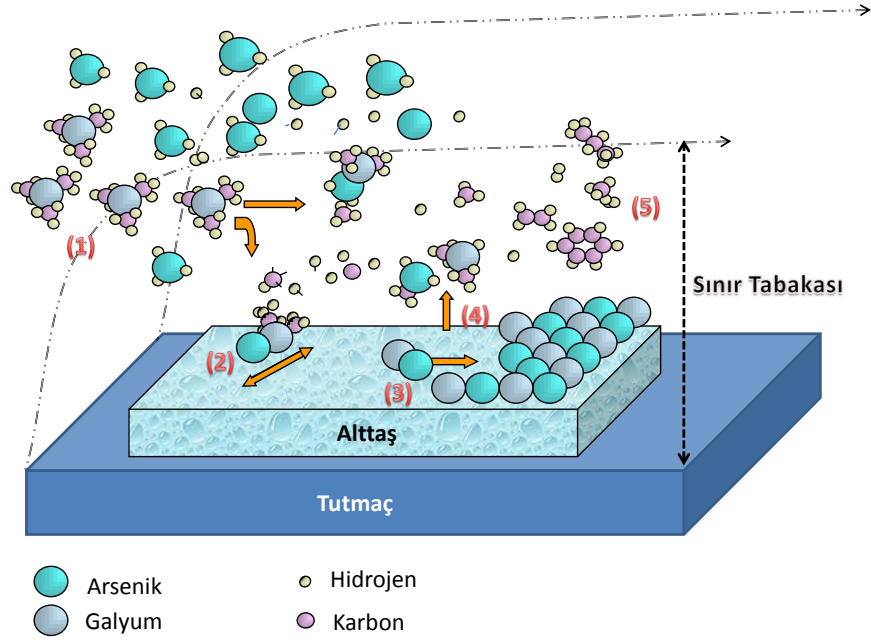
3.3.2. Yüzey Kinetikleri

Termodinamik denge kavramı kapalı (çevreyle etkileşimi olmayan) bir sistemin durumunu belirlemede kullanılır. Fakat MOCVD büyütme süreçleri, bir denge durumu süreciyle tanımlanamaz. Bu yüzden termodinamik, büyütme sürecinde yalnızca belli limitleri tanımlayabilir. Bu durum kinetik süreçlerin detaylıca ele alınmasını gerekli kılmaktadır.

MOCVD büyütme sürecinde birkaç tipte reaksiyon gerçekleşebilir. Tamamıyla gaz fazdaki atomlar arasında oluşan reaksiyonlara homojen reaksiyonlar, kristal yüzeyi üzerindeki katılar ile gaz fazdaki atomlar arasında oluşan reaksiyonlara da heterojen reaksiyonlar denilir. Normalde her iki tip reaksiyon da şu şekilde olacaktır; birincisi, diğer türlerle etkileşme olmaksızın enerjik olarak aktive edilmiş bir türün değişim sürecidir ki unimoleküler olarak adlandırılır. İkincisi, iki türün çarpmasıyla gerçekleşen aktive edilmiş bir kompleks oluşmasıdır ve bu kompleks daha sonra unimoleküler reaksiyona uğrar, bu süreçte bimoleküler olarak adlandırılır.

Trimetilgalyum ((CH₃)₃Ga (TMGa)) ve arsin (AsH₃) kullanarak GaAs büyütülmesi, MOCVD tekniğinde en çok çalışılmış profillerden biridir. TMGa

genellikle H_2 gazıyla biriktirme bölgesine taşınır. Genellikle büyütme ortamında alkil metallerin üzerinde, pek fazlasıyla V grubu elementleri bulunur (bu örnekte As). Bunun nedeni şudur; V grubu hidritler, alkil metallere kıyasla daha düşük yapışma katsayısına sahiptir ve nispeten ayrışması yetersizdir. İşte bu durumu dengeleyebilmek için, büyütme ortamında fazlasıyla V grubu elementi bulundurulur.



Şekil 3.21 GaAs büyütme sürecine ilişkin adımların basitleştirilmiş bir şekli.

III–V bileşikleri içinde en yaygın olarak kullanılan ve en iyi bilinen yapılardan biri olan, trimetilgalyum ve arsin kullanılarak GaAs büyütülme sürecinde, altaş yüzeyinde ve dolayında gerçekleşen olaylar Şekil 3.21’de şematik olarak kabaca ifade edilmiştir. GaAs tabakasının büyüme sürecine ilişkin birkaç adımı ele alalım:

- 1) Arsin ve TMGa'un hidrojen (taşıyıcı gaz) yardımıyla sınır tabakasına taşınması
- 2) Atomik ve/veya moleküler yüzey difüzyonu ve kimyasal reaksiyonlar
- 3) Reaktantların alttaşa tutunarak GaAs örgüsüne birleşmesi
- 4) Bazı reaktantların alttaştan geribırakılması
- 5) Yan ürünlerin alttaştan uzaklaştırılması

Bu adımlar oldukça basitleştirilmiştir. Aslında yüzey reaksiyonları ve GaAs çekirdeklenmesi çok daha karmaşıktır. Daha genişletilmiş bir model Jensen (1991) tarafından geliştirilmiştir. Jensen modelinde, tipik bir yatay MOCVD reaktörü içinde, akışkan akışı ve ısı transferi modellerini birleştirerek farklı bir fizikokimyasal MOCVD süreci sunmuştur. Bu modelde GaAs büyütme oranının ve karbon bulaşmasının sıcaklıkla, basınçla ve III-V oranıyla değişimleri incelenmiştir. Bu mekanizmanın temel kimyasal reaksiyonları Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4'de sunulmuştur.

MOCVD tekniğinde kimyasal reaksiyon serilerinin gidişatı tam olarak anlaşılabilir. Büyütme sürecindeki yüzey reaksiyon mekanizması çok sayıda olası reaksiyon tarafından komplike edilir. Buna ilişkin bir örnek olarak Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4 'da değinilen kimyasal reaksiyon süreçlerini içeren, genel reaksiyon gidişatı şöyledir: Organometallerin pirolitik ayrışmaları ve gaz fazda hidrojen radikalleri ile reaksiyonlar (G1-G7), heterojenik ayrışmalar, yüzey tutunmaları ve geribırakmaları (S1-S13). Ga ve As içeren yüzey önkaynakları arasındaki reaksiyonlar vasıtasıyla GaAs kristalinin gelişiminin gerçekleşmesi (S22 ve S26). Uçucu reaksiyon yan ürünleri gaz fazda çarpışan radikallere tutunarak (S14-S17, S24) ve bimoleküler yüzey rekombinasyon reaksiyonlarıyla (S18-S21, S23, S25) yüzeyden uzaklaştırılması. S8-S10 reaksiyonlarına müteakip karbon bulaşmasının gerçekleşmesi şeklindedir.

Çizelge 3.3 TMGa ve AsH₃ kullanılarak GaAs büyütme sürecindeki, alttaş yüzeyinde ve yüzey çevresinde oluşan reaksiyonlar ve gaz-faz reaksiyonları. S_A, S_G sırayla arsenik ve galyum alanlarını belirtir. (*) işareti de yüzey geribırakmasına temsil etmektedir (Jensen, 1991).

Gaz-faz reaksiyonları	
(G1)	$\text{Ga}(\text{CH}_3)_3 \rightarrow \text{Ga}(\text{CH}_3)_2 + \text{CH}_3\cdot$
(G2)	$\text{Ga}(\text{CH}_3)_2 \rightarrow \text{GaCH}_3 + \text{CH}_3\cdot$
(G3)	$\text{CH}_3\cdot + \text{AsH}_3 \rightarrow \text{AsH}_2 + \text{CH}_4$
(G4)	$\text{CH}_3\cdot + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}\cdot$
(G5)	$\text{H}\cdot + \text{H}\cdot + \text{M} \rightarrow \text{H}_2 + \text{M}$
(G6)	$\text{CH}_3 + \text{H}\cdot + \text{M} \rightarrow \text{CH}_2 + \text{M}$
(G7)	$\text{CH}_3\cdot + \text{CH}_3\cdot \rightarrow \text{C}_2\text{H}_6$
(G8)	$\text{GaCH}_3\cdot + \text{CH}_3\cdot \rightarrow \text{GaCH}_2 + \text{CH}_4$
(G9)	$\text{GaCH}_2 + \text{H}\cdot \rightarrow \text{GaCH}_3$
(G10)	$\text{Ga}(\text{CH}_3)_3 + \text{CH}_3\cdot \rightarrow \text{Ga}(\text{CH}_3)_2\text{CH}_2 + \text{CH}_4$
(G11)	$\text{Ga}(\text{CH}_3)_2\text{CH}_2 + \text{H}\cdot \rightarrow \text{Ga}(\text{CH}_3)_3$
(G12)	$\text{Ga}(\text{CH}_3)_2\text{CH}_2 \rightarrow \text{Ga}(\text{CH}_3)\text{CH}_2 + \text{CH}_3$
(G13)	$\text{Ga}(\text{CH}_3)\text{CH}_2 \rightarrow \text{GaCH}_2 + \text{CH}_3$
(G14)	$\text{Ga}(\text{CH}_3)_3 + \text{H}\cdot \rightarrow \text{Ga}(\text{CH}_3)_2 + \text{CH}_4$
(G15)	$\text{Ga}(\text{CH}_3)_2 + \text{H}\cdot \rightarrow \text{Ga}(\text{CH}_3) + \text{CH}_4$
(G16)	$\text{Ga}(\text{CH}_3)_2 + \text{CH}_3\cdot \rightarrow \text{Ga}(\text{CH}_3)\text{CH}_2 + \text{CH}_4$
(G17)	$\text{Ga}(\text{CH}_3)\text{CH}_2 + \text{H}\cdot \rightarrow \text{Ga}(\text{CH}_3)_2$

Çizelge 3.4 TMGa ve AsH₃ kullanılarak GaAs büyütme sürecindeki, alttaş yüzey reaksiyonları (Jensen, 1991).

Yüzey reaksiyonları	
(S1)	$H\cdot + S_G \rightarrow H_G^*$
(S2)	$H\cdot + S_A \rightarrow H_A^*$
(S3)	$CH_3\cdot + S_G \leftrightarrow (CH_3)_G^*$
(S4)	$CH_3\cdot + S_A \leftrightarrow (CH_3)_A^*$
(S5)	$GaCH_3 + S_G \leftrightarrow CH_3^*$
(S6)	$Ga(CH_3)_2 + S_G \rightarrow GaCH_3^* + CH_3\cdot$
(S7)	$Ga(CH_3)_3 + S_G \rightarrow GaCH_3^* + 2CH_3\cdot$
(S8)	$GaCH_2 + S_G + S_A \rightarrow GaC + H_2$
(S9)	$Ga(CH_3)CH_2 + S_G + S_A \rightarrow GaC + CH_3\cdot + H_2$
(S10)	$Ga(CH_3)_2CH_2 + S_G + S_A \rightarrow GaC + 2CH_3\cdot + H_2$
(S11)	$AsH + S_A \leftrightarrow AsH^*$
(S12)	$AsH_2 + S_A \leftrightarrow AsH^* + H\cdot$
(S13)	$AsH_3 + S_A \leftrightarrow AsH^* + H_2\cdot$
(S14)	$CH_3\cdot + H_G^* \rightarrow CH_4 + S_G$
(S15)	$CH_3\cdot + H_A^* \rightarrow CH_4 + S_A$
(S16)	$H\cdot + (CH)_G^* \rightarrow CH_4 + S_G$
(S17)	$H\cdot + (CH)_A^* \rightarrow CH_4 + S_A$
(S18)	$H_G^* + (CH)_A^* \rightarrow CH_4 + S_A + S_G$
(S19)	$H_A^* + (CH)_G^* \rightarrow CH_4 + S_A + S_G$
(S20)	$H_G^* + H_A^* \rightarrow H_2 + S_A + S_G$
(S21)	$(CH_3)_A^* + (CH_3)_G^* \rightarrow C_2H_6 + S_A + S_G$
(S22)	$GaCH_3^* + AsH^* \rightarrow GaAs + CH_4 + S_A + S_G$
(S23)	$AsH^* + AsH^* \rightarrow As_2 + H_2 + 2S_A$
(S24)	$CH_3\cdot + AsH^* \rightarrow As^* + CH_4$
(S25)	$As^* + As^* \rightarrow As_2 + 2S_A$
(S26)	$GaCH_3^* + As^* \rightarrow GaAs + CH_3\cdot + S_G + S_A$

3.4. Akış Desenleri ve Reaktör Tasarımı

Verimli bir büyütme sağlayabilmek için reaktör odasının tasarımı ve bir o kadar reaktantların reaktöre giriş düzeni son derece önemlidir. Reaktör geometrisinin uygunsuz oluşu bir takım problemleri beraberinde getirir.

MOCVD tekniğinde büyütülen kristalin kalitesini belirleyen en önemli etkenlerden biri de akış desenin arzulanan tarzda olmasıdır. MOCVD reaktöründe olası gaz hareketlerini aşağıdaki gibi tayin edebiliriz.

1. Türbülansa karşı laminer akış düzeni
2. Kaldırma kuvveti kaynaklı serbest konveksiyona karşı difüzyon

Yukarıda değinilen farklı tipteki akış durumlarını incelerken, ilk durum için Reynolds sayısı ve ikinci durum için de Rayleigh sayısı olmak üzere iki yeni kavrama ihtiyacımız vardır.

Reaktör odasına kütle taşınması büyüme hızını belirlediği için, bu parametre akış dinamikleri ile birlikte biriktirme oranını yönetir ve böylece gaz karışımı tüketilerek kristal oluşur. Yüksek kaliteli yapılar büyütebilmek için başka bir deyişle reaktör yapısını en verimli duruma getirmek için konsantrasyon profili ve akış desenleri hakkında derinlemesine bilgiler zaruridir. Heteroeklemler ve keskin ara yüzeyli süperörgüler büyütme için geniş yüzeyli bölgelerde homojenik büyümeler yapılabilmesi ve hafıza etkilerinin minimize edilmesi çok önemlidir. Bunları başarmak için; reaktöre gazlar kontrollü bir yolla alınmalı ve büyütme sürecinin tümünde türbülanssız laminer akış düzeni korunmalıdır. Aynı zamanda sınır tabakasında gerçekleşen doğal konveksiyon da büyüme etkileyen önemli bir parametredir. Burada kullanılan sınır tabakası; alttaşa dik olarak hızlıca artan kompozisyonları, termal veya momentum gradyentleri tanımlamak için kullanılan bir bölgedir.

3.4.1. Laminer ve Türbülans Akış

Düzgün bir boru içindeki kararlı akışkan akışını düşünelim. İlk önce, akış düzgün olarak başlayabilir. Ama akabinde bozuk bir akış olabilir. z mesafesini kat ettikten sonra akışın hızı $V(r)$ Şekil 3.22 (a)'da gösterildiği gibi parabolik bir görünüm alır (Stringfellow, 1989).

$$V(r) = -\frac{1}{4\eta} \frac{dp}{dz} (a^2 - r^2) \quad (0 \leq r \leq a) \quad (3.14)$$

Burada dp/dz basınç gradyenti, a arakesit yarıçapı, r radyal eksen ve η de dinamik viskozitedir. Parabolik bir profil olması nedeni; gerçek bir gazın bir tüp içerisinde hareket ederken kaymaksızın tüp çeperine yapışma eğilimde olmasından kaynaklanmaktadır.

Laminer bir akışta sabit bir pozisyondaki reaktantların hızları daima aynıdır. Reaktantların her biri tanımlanmış bir yol boyunca güzelce hareket eder ve her bir element başlangıçta aynı yerden başlayarak kendisine has aynı yolu takip eder. Laminer akış düzeni, akış yoluna büyük bir açıyla konulan bir engelle (Şekil 3.22 (c) ve (d)) veya tüp çapı değiştirilmek suretiyle (Şekil 3.22 (e) ve (f)) kolaylıkla bozulabilir.

Şekil 3.22 (c) ve (d)'de bir tüpün duvarından gaz moleküllerinin kurtulması veya yapışması temsil edilmektedir. Engelin ucuna temas eden akıntı başka bir yere hareket edemez ve bu noktada akış yüzeyden kopar. Bu kopan akıntının ardındaki dalga yavaşça dönerek kararlı bir girdap dalgası oluşturabilir. Akış yönüne göre büyük bir açıyla reaktör odasına yerleştirilen tutmaç durumunda ise akışta geri dönmeler söz konusudur.

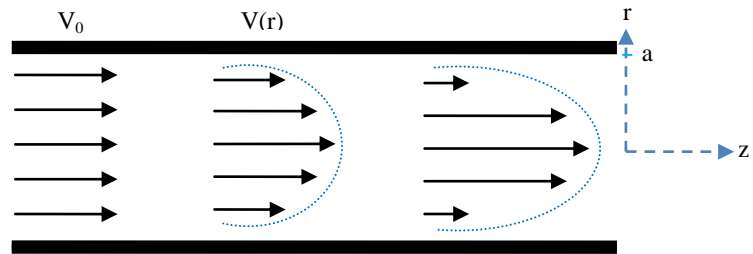
Şekil 3.22 (e) ve (f)'de olduğu gibi, boru içinde akan bir gazın arakesit alanını artırmak veya azaltmak yoluyla ani bir değişikliğe gidilirse basınçta da bu değişime ilişkin bir azalma veya bir artma olacağını göstermektedir. Bu tarzda, ani bir

momentum değişmesi girdaplı akımların oluşmasını tetikleyecektir. Daha da önemlisi çok yüksek akış hızlarından dolayı girdaplar oluşabilir. Akış tabakaları arasındaki sürtünme fazlalaşırsa artık akış yönünde bozukluklar oluşarak normal akış yerine tedricen kaotik veya türbülans akış düzeni gelişmeye başlar. Borunun genişleme oranı basınçta bir azalmaya neden olacaktır ve buda ister istemez akışın düzgün veya türbülanslı olmasını belirleyecektir. Genel olarak, θ açısı kritik değerden ($\sim 7^\circ$) daha büyük değer alırsa laminar akıştan türbülans akışa geçmeler oluşur.

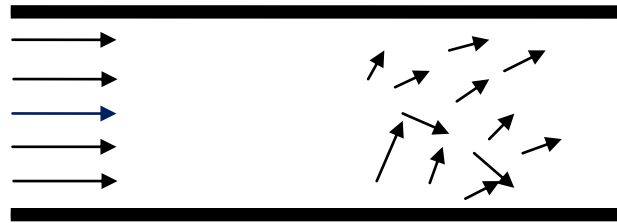
Akış türbülans olduğunda, hem zamansal hem de uzamsal olarak ani ve düzensiz hız dalgalanmaları aşırı derecede gelişir. Bu durumda akış gazları düzensiz ve bozulmuş yolları takip eder. Bu olay Şekil 3.22 (b) de temsil edilmektedir. Tüm zaman boyunca düzensizlik devam ettiği için aynı başlangıç noktasındaki parçacıklar artık farklı yolları takip ederler (Shapiro, 1961). Düzensiz hareketler moleküllerin tamamını aynı anda etkileyemezler. Ortalama hızda önemli bir değişiklik olmadığı takdirde akışın hâlâ kararlı olduğu varsayılır. Bir gaz akışının laminar veya türbülans rejiminde olacağına Reynolds sayısı karar verir. Reynolds sayısı şu şekilde tanımlanır:

$$Re = \frac{\rho \vartheta d}{\eta} \quad (3.15)$$

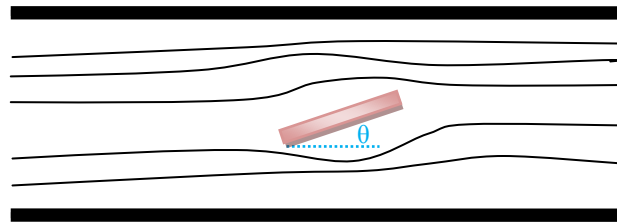
Burada ρ yoğunluk (kg m^{-3}), ϑ ortalama akış hızı (m s^{-1}), d tüp çapı (m) ve η de dinamik viskozitedir. Re sayısı 100 den küçük olduğunda akış rejimi laminardır. Laminar akışta, sabit bir pozisyondaki hızlar daima aynıdır. Reaktif türlerin her bir elementi belirli bir yol boyunca güzelce hareket eder. Aynı başlangıç konumundaki her bir element kendilerine has aynı yolu takip eder. Yani akış hatları birbirine karışmadan boru içinde yollarına devam ederler.



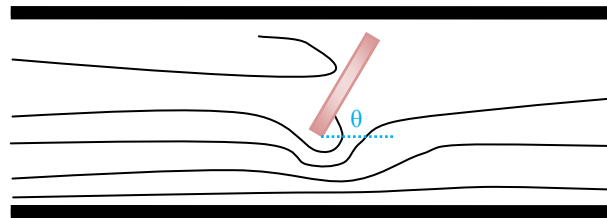
(a)



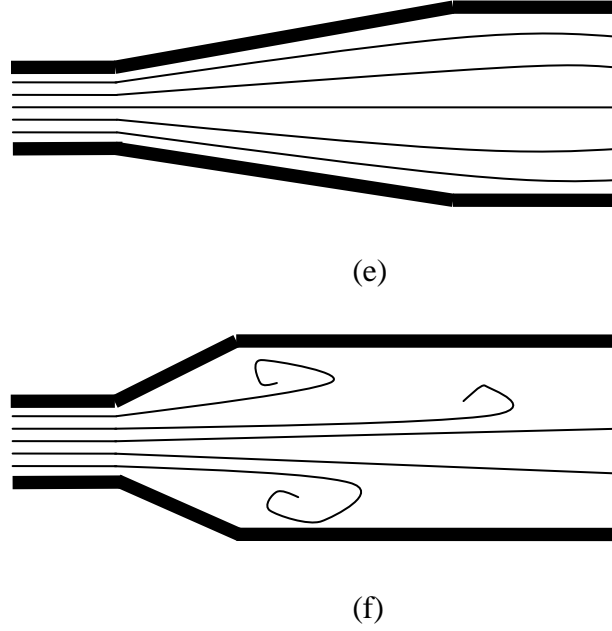
(b)



(c)



(d)



Şekil 3.22 Olası akış desenlerinin şeması. (a): z mesafesini kat ettikten sonra akış hızı parabolik bir görünüm alır, (b): Akış türbülans olduğunda, hem zamansal hem de uzamsal olarak ani ve düzensiz hız dalgalanmaları aşırı derecede gelişir. Laminer akış düzeni, akış yoluna büyük bir açıyla konulan bir engelle (c) ve (d) veya tüp çapı değiştirilmek suretiyle (e) ve (f) kolaylıkla bozulabilir. (c) ve (d)'de tutmaç açısının akış üzerindeki etkisi temsil edilmektedir. (e) ve (f)'de borunun genişleme oranı basınçta bir azalmaya neden olacaktır ve bu durum ister istemez akışın düzgün veya türbülanslı olmasını belirleyecektir. Genel olarak, genişleme açısı kritik değerden ($\sim 7^\circ$) daha büyük değer alırsa laminer akıştan türbülans akışa geçmeler oluşur.

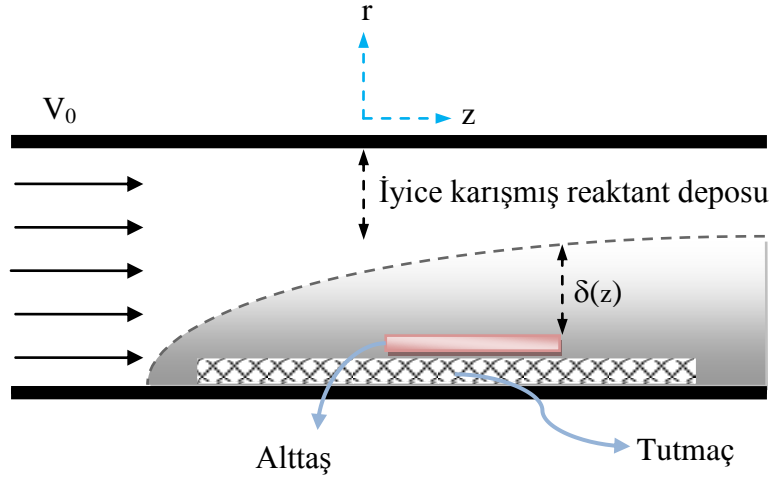
Re değeri yüksek ise akışın hızında, uzaysal ve zamansal olarak gelişigüzel bir tarzda hızlı, düzensiz dalgalanmalar söz konusudur. Bu durumda, gaz akışını oluşturan elemanlar fazlasıyla bozulmuş bir yolu takip ederler. Aynı başlangıç noktasındaki elementler artık farklı yolları izlerler. Çünkü bu düzensizlikler deseni tüm zaman boyunca değiştirir.

Şimdi, hız dağılımı Şekil 3.23'de gösterildiği gibi paralel akışları düşünelim. Yassı bir plaka (alttaş/tutmaç) sisteme eklenmeden önce akış V_0 hızında düzgün bir tarzda hareket etmektedir. Plaka sisteme katıldığında, plakaya bitişik olarak, akışın üst bölgelerine nazaran parçacıkların daha düşük hızlarda hareket ettikleri “sınır

"tabakası" gelişir. $z > \delta_0$ şartında gelişen sınır tabakasının kalınlığı aşağıdaki formülle verilir (Schlichting, 1968).

$$\delta(z) = 4.56 (D z / V_0)^{1/2} \quad (3.16)$$

Burada D difüzyon katsayısı ve V_0 giriş hızıdır. Sınır tabakasının kalınlığı en uçtan ölçülen mesafe olan z 'nin kara kökü ile orantılıdır.



Şekil 3.23 Yatay bir reaktördeki bir gaz akış gösterimi

3.4.2. Isı etkisi

Hem tüp duvarlarında birikme olmaması için hem de akışı daha iyi kontrol edebilmek için sistem ısıtılabilir. Doğal olarak, bu durum gaz akışına ekstra bir komplekslik katar. Çünkü ısı sonucu oluşan konveksiyon, gaz akışı üzerinde önemli bir rol oynar. Yatay bir reaktördeki oda duvarıyla sıcak tutmaç arasındaki sıcaklık farkları gaz akışını etkilemek için yeterlidir.

Termal difüzyon büyük ve ısı farkı küçük olduğunda, mikroskobik momentum değişimi hızlı olduğundan makroskobik gaz yoğunluğunda önemli bir değişiklik

oluşmaz. Bu nedenle net bir kaldırma kuvveti oluşmaz, bu durumdaki gaza yarı-kararlı gaz denir. Daha yüksek sıcaklık gradyent ve daha küçük ısı iletiminde, ağır, serin gazlar aşağı doğru ve hafif, ılık gazlarda yukarı doğru hareket ederler. Bu durumda kaldırma kuvvetinden dolayı serbest konveksiyon oluşur. Reynolds sayısına benzer şekilde bu olay Rayleigh sayısıyla (Ra) karakterize edilir.

$$Ra = \frac{\alpha g C_p \rho^2 h^3 \Delta T}{\eta k} \quad (3.17)$$

Burada $\Delta T = T_{\text{sıcak tutmaç}} - T_{\text{reaktör duvarı}}$, α termal genişleme katsayısı (K^{-1}), g yerçekimi sabiti (9.81 m s^{-2}), C_p özgül ısı ($J \text{ kg}^{-1} K^{-1}$), ρ yoğunluk (kg m^{-3}), h tutmacın üstündeki boşluğun yüksekliği (m), η dinamik viskozite ($\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) ve k termal iletkenlik ($J \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1} K^{-1}$)'dir. $Ra \leq 1700$ değerlerinde gaz kararlıdır, ilgili değerlerin üst değerlerinde ise serbest konveksiyon oluşur (Razeghi, 1995).

Rayleigh sayısının yüksek değerlerinde serbest konveksiyon oluşur ve bu olay kütle transferine, büyütme hızına ve homojenliğine hasar verir. Daima sıcak alttaş ile soğuk reaktör duvarı arasında konveksiyon oluşur. Konveksiyonun nedeni ise şudur; sıcaklık değişmesiyle orantılı olarak yoğunluğun da değişmesi ve bu değişim üzerine yerçekiminin etkimesidir. Sıcak hafif gazlar, soğuk ağır gazların üzerine konumlanır. Eğer önce aşağı yönde daha sonra yukarı yönde bir devinim olursa bu durum hareket için kinetik enerji sağlar ve dengenin istikrarsızlaşmasına sebebiyet verir.

Gazların kinetik teorisini göz önünde bulundurursak hem dinamik viskozite (η) hem de termal iletkenlik (k) reaktör basıncından bağımsızdır. Ancak yoğunluk (ρ) basınçla ilintilidir. Reynolds sayısı ρ ile ve Rayleigh sayısı da ρ^2 ile orantılı olduğunu yukarıdaki denklemlerde görmüştük (Denk. (3.15) ve (3.17)). Yani, daha düşük basınçlar, gaz akışının davranışını daha kararlı kılar ve bu sayede laminar akış elde edilmesi kolaylaşır.

Tutmaç yüzeyi civarındaki i kimyasal türün akısı (J_i) artık yerel sıcaklığa, yerel sıcaklık gradyentine ve reaksiyon süresince moleküllerin oluşmasına veya yok olmasına bağlıdır (Giling, 1985).

$$J_i = \frac{D_i}{R T} \left(\frac{P_t}{P_t + (n-1)P_i} \frac{\partial P_i}{\partial z} + \alpha_i \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3.18)$$

Burada $D_i(T) = D_0(T/T_0)^2$, T 'nin bir fonksiyonu olarak i türünün ikili difüzyon katsayısıdır, P_t toplam basınç, P_i i bileşenin kısmi basıncı, n reaksiyon öncesi ve sonrası molekül sayısının oranı, z tutmaç yüzeyinin yönü ve α_i de ilgili tür için termal difüzyon faktörüdür.

3.4.3. Akış Deseni ve Reaktör Tasarımı için Modellemeler

MOCVD tekniği pek pahalı bir teknik olduğundan ve faal durumdaki bir sistemin modifiye edilmesi oldukça zor olduğundan, sistem mümkün olduğu kadar kusursuz bir şekilde tasarlanmalı ve kurulmalıdır. Bu bağlamda, sistemin kusursuzluğunu artırabilmek için oldukça pahalı modellemeler yapılmaktadır. Gaz akış desenleri ve bu akış desenlerine reaktör tasarımının etkileri için iki genel yaklaşım vardır. Birinci yaklaşım deneysel gözlemlere ve simülasyonlara dayanmakta, ikincisi ise sayısal hesaplamalara dayanmaktadır.

a. Akış canlandırması

Akış desenleri duman partikülleri kullanılarak çalışabilir (Ban, 1978). Genellikle reaktör içindeki akış desenlerini canlandırmak için TiO_2 dumanı kullanılır. Bu deneyler; tutmaca bitişik bir sınır tabakasının, akışa dik sıcaklık gradyentinin ve konveksiyon nedenli gaz hareketinin varlığı ve niteliği hakkında bilgiler sağlanmaktadır. Ayrıca bu deneyler gaz fazda momentum aktarımının iç yüzünün anlaşılmasında da kullanılır. Bununla beraber, duman testinde bir yetersizlik vardır.

Bu testlerde kullanılan duman partikülleri gerçek gazlara göre daha ağır oldukları için sınır tabakasının kalınlığı net olarak teşhis edilemez.

b. Gaz akışlarının holografik incelenmesi

Sıcaklık gradyentlerini derinlemesine araştırmak için Giling (1985), holografik inceleme tekniğini kullanmıştır. Bu metotta ilk durumu temsil eden kaynak demet ve değişmiş ikinci durum hakkında bilgi içeren örnek demet birbiriyle karşılaştırılır. İki ışık yolundaki küçük farklılıklar girişim deseni oluşturarak sistem hakkında fikir yürütülmesine yardım etmektedir. Eğer gaz türbülanslı ise saçak (ışın kırılmasından meydana gelen koyu çizgiler) çizgilerinin tümü tutarsız bir resim vererek şekilde hareket edecektir. Gaz konvektif olduğunda izotermler aşağı veya yukarı eğilecektir. Son olarak, gaz akışı laminer ve konveksiyona karşı değişmez ise sıcak yüzeye paralel saçaklar oluşur. Giling, H₂, N₂, Ar ve He olmak üzere dört tane taşıyıcı gazın akış resimlerini analiz etmiştir.

c. Berkman modeli

Berkman (1977) alttan ısıtılan, soğuk duvarlı bir yatay reaktörde akış dinamikleri, kütle ve termal gradyentleri üzerine detaylı bir model geliştirmiştir. Bu çalışmada deneysel gözlemlerle iyice uyuşan, hidrodinamik akış teorilerinden türetilen gayet kullanışlı formüller elde etmiştir.

Bir reaktörde tutmaç üzerinde iki farklı bölge vardır. Tutmacın yakınındaki gaz hemen hemen laminer bir tarzda akar. Bunun üzerindeki gaz akışı 3-5 Hz salınımlı türbülans bir tarzdadır. Sıcak tutmaçtan kaynaklanan kaldırma kuvvetiyle ve termal giriş etkileriyle türbülans oluşması kaçınılmazdır. Çünkü laminer bir tarzda başlayan akışlar yol üzerindeki tutmaç ve alttaş ile karşılaştığında akış düzeni bozulur. Berkman'ın modeli türbülans bölgesinin daha üstünde yer alan bir reaktant deposu gibi davranan iyice karışmış gaz bölgesini ele alır. Daha alt bölge bir laminer sınır tabakası gibi davranır ve buraya reaktantlar difüzyonla aktarılır. Yüzen tutmaç (float susceptör) için büyüme oranı tutmaç boyunca eksponansiyel olarak azalır.

Cebirsel olarak e^{-Az} formundadır. Burada $A = 2 D_T / V_T b_0^2$ 'dir. Bu denklemdeki V_T düzeltilmiş sıcaklıktaki gaz hızı, D_T T sıcaklığındaki reaktantın difüzyon katsayısı ve b_0 da tutmaç üzerindeki kanalın giriş yüksekliğidir. Tutmacı eğmek suretiyle yani θ_c açısını değiştirerek ($3-5^\circ$ konumunda tutarak) istenmeyen eksponansiyel değişim etkisiz kılınabilir.

$$\sin(\theta_c) = \frac{2 D_0}{b_0 V_0} \left(\frac{T_a}{T_0} \right)^{0.88} \quad (3.19)$$

burada D_0 oda sıcaklığında ölçülmüş önkaynak molekülünün difüzyon katsayısı, T_0 oda sıcaklığı, T_a tutmaç üzerindeki gazın ortalama sıcaklığı, V_0 ; T_0 'da tutmacın önünde bulunan gazın ilk hızıdır. Düşük basınç MOCVD (~ 0.1 atm) sistemi V_0 değerini artırarak $\sin(\theta_c)$ 'nin sıfıra yaklaşmasına izin verir.

d. Akış desenlerinin sayısal simülasyonu

Epitaksiyel sistemlerde kütle transfer problemlerini kütle süreklilik denklemi, Navier-Stokes denklemi (momentum korunumu), reaktörün geometrisine uygun sınır şartları, ısıtma teknikleri ve gaz giriş/çıkış akışı gibi parametrelerle çözmeyi sağlayan bir modellemedir (Rosenberger, 1979). Teknolojinin ilerlemesiyle (süper-bilgisayarlar kullanımıyla) sayısal modeller de gelişerek iki boyutlu basit tasvirlerden üç boyutlu kompleks tasvirleri yapabilecek konuma yükselmiştir.

Farklı konfigürasyonlardaki reaktör hücrelerinde karma konveksiyon akışlarının doğasını ve kaynağını anlamak için ve ayrıca reaktör geometrisi ve basınç parametrelerinin akış deseni üzerindeki etkilerini araştırmak için çok sayıda oldukça yorucu çalışmalar yapıla gelmiştir ve bu incelemeleri baz alan farklı sayısal modellemeler geliştirilmiştir.

Ayrıca TMGa ve AsH₃ kullanılarak GaAs büyütümü için üç boyutlu akış modellemesi yayınlanmıştır (Jensen, 1991). Bu modelde kimyasal kinetik mekanizmaların oluşması ve transfer süreçleri hakkında detaylı tasvirler yer

almaktadır. Bu tasvirler cebirsel olarak oldukça büyük denklem takımlarını ve bu denklemlerin çözümü için fazlasıyla yorucu çözüm tekniklerini ve yaklaşımlarını beraberinde getirir. Bu teknikte, ilgili kısmi diferansiyel denklemler ve sınır şartları lineer olmayan büyük mertebeli cebirsel denklem takımlarına dönüştürülerek, özel çözüm metotlarıyla süper-bilgisayarlarda çözümleri yapılmıştır.

3.4.4. Büyütme Kalitesini Artırma Girişimleri

Gaz fazdaki parazit reaksiyonlardan kaçınmak için ve reaktörün biriktirme bölgesinin girişindeki yoğunlaşmayı önlemek için başka bir deyişle yüksek kalitede keskin arayüzeyle III-V yarıiletken materyallerini verimli bir şekilde büyütebilmek için yoğun ve bir o kadar da yorucu çabalar harcama gelmektedir. Günden güne ve sistemden sisteme değişebilen bu çalışmaları aşağıdaki gibi özetleyebiliriz (Giling, 1985; Razeghi, 1989).

- (1) Sıralanan maddeleri uygulayarak konveksiyon olmaksızın laminar akış sağlanmalı
 - (a) Bir yatay reaktör kullanarak
 - (b) Düşük basınçta çalışarak
 - (c) Reaktör çapını daraltarak
- (2) Tutmacın bütününde herhangi bir sıcaklık gradyenti olmamalı
- (3) Hafıza etkileri giderilmeli
 - (a) Reaktörün geometrisi vortekslerinin gelişimine izin vermeyecek bir tarzda tasarlanarak
 - (b) Reaktör içinde ölü hacimleri yok ederek

Reaktör girişinin keskin köşelerine ve tutmacın arka tarafına dikkat edilmelidir. Aksi takdirde buralarda oluşabilecek ölü kısımlar laminar akış düzenine hasar verecektir. Tutmaç, yatay eksene göre büyük bir açıyla yerleştirildiğinde tutmacın arkasında ve keskin köşelerinde vorteksler gelişecektir. Hem vorteksler hem

de ölü kısımlar, sistemden giderilmesi oldukça zor, istenmeyen bir kaynak materyal gibi hareket edecekleri için bu noktalara dikkat etmek son derece önemlidir.

Ayrıca, gaz işleme manifoldundaki ve büyütme hücresindeki bir takım parametreler de büyütme kalitesi için gayet önemlidir. Manifold sistemi, homojenik karışım sağlamak için atomik düzeyde karıştırmayı mümkün kılmalıdır. Bunun yanı sıra, alttaş döndürülerek gaz tüketimi ve geometrik hasarlar minimize edilmelidir (Frijink, 1988).

MOCVD büyütme mekanizmaları, gaz akış desenleri ve kimyasal reaksiyonların gidişatı hâlâ tam anlamıyla anlaşılmış değildir. Büyütme sıcaklığı, reaktör basıncı, toplam taşıyıcı akışı, III-V oranı gibi optimum büyütme parametreleri, dâhili ve harici karakterizasyon tekniklerinin yardımıyla belirlenir. Bu belirlemelerde teorik hesaplamalara kıyasla deneysel sonuçlar daha bağlayıcıdır.

3.5. III – V Grubu Önkaynaklar (*Precursors*)

Bir MOCVD sisteminde önkaynakların buhar basıncı çok önemlidir. Çünkü reaktördeki kaynak materyalin konsantrasyonu ve biriktirme oranı buhar basıncıyla doğrudan bağlantılıdır. Eğer buhar basıncı çok düşükse, boru hatlarında yoğunlaşma olasılığı yüksek olacağından önkaynağın biriktirme bölgesine transferinde problemlerin oluşması kaçınılmazdır ki bu durum, hedeflenen yetiştirme oranına ulaşılmasını güçleştirir. Eğer buhar basıncı çok yüksek ise, bu kez gaz transferi kontrolsüz bir hale gelecektir. Ayrıca, bu gazlar fazlasıyla zehirli olduğu hatırlanırsa güvenlik endişelerini artacağı kesindir.

Önkaynakların katı formda olmasına kıyasla kaynama noktasına yakın bir seviyede sıvı formda tutulması, kütle-transfer kontrolünü daha çok artıracaktır. Genellikle, bu özelliği III ve V grubu elementleri tek başına sağlayamadıkları için ilgili türlerin metalorganik (organometalik) veya hidrit formları tercih edilmektedir. Metalorganik bileşikler oldukça geniş bir yelpaze sunduğu için ilgili önkaynağın seçiminde birçok seçenek vardır. Bununla beraber, bu bileşikler fazlasıyla problemliler olduğundan özel muhafaza tüplerinde (bubbler) muhafaza edilir. Ayrıca, özellikle metalorganik bileşiklerin buhar basıncını daha iyi kontrol edebilmek için bu tüpler termal banyolarla desteklenirler. Hassasça ölçülen taşıyıcı gaz dip-tüp sistemiyle bubbler'a basılır. Taşıyıcı gaz bubbler'dan çıkarken ilgili önkaynağı da beraberinde götürür. Doğal olarak, bu esnada taşıyıcı gazın önkaynağa nüfuz edebilmesi için önkaynak uygun bir buhar basıncında olmalıdır. MOCVD sisteminde kullanılan önkaynakların bulundurulması gereken vasıflarını aşağıdaki gibi özetleyebiliriz:

- ✓ Üretim ve saflaştırma süreçlerinde problem oluşturmadan emniyetli bir ortam sağlamalı
- ✓ Mümkünse saf, değilse kirleticilerden arındırabilir olmalı
- ✓ Oda sıcaklığında kararlı olmalı, kendiliğinden ayrışmaya veya polimerleşmeye meyilli olmamalı

- ✓ Kolayca transfer edilebilmesi için bozulmadan (ayırışmadan) H_2 , N_2 veya He gibi taşıyıcı gazları içinde buharlaşabilmeli
- ✓ Boru hatlarında yoğunlaşmaması için uygun bir buhar basıncında olmalı
- ✓ Aynı büyütmeye kullanılan önkaynakların termal kararlılıkları çok farklı olmamalı
- ✓ Çalışma ortamındaki olası sızıntıları emniyete almak için asgari zehirlilikte olmalı ve
- ✓ Çevre kirliliğini önlemek için büyütmeye sonrasında atıkların scrubber'larda mümkün olduğu kadar temizlenebilir olmalı.

Çizelge 3.5 ve 3.6'da tipik bir MOCVD sisteminde yaygın olarak kullanılan bazı önkaynaklar ve kullanım amaçları listelenmektedir. Bu kimyasalların genellikle dört harflik kısa adları vardır. Örneğin trimetilgalyum, TMGa şeklinde kısaltılmıştır. III grubu kaynağı olarak genellikle TEIn, TMIn ve TEGa kullanılır. Hidritler (arsin (AsH_3), fosfin (PH_3)) de V grubu kaynağı olarak kullanılır. Taşıyıcı gaz olarak genellikle yaygınca saf hidrojen (H_2), azot (N_2) veya her ikisinin karışımı kullanılabilir. Bu iki gazın muhtelif durumlarda birbirine göre üstünlükleri vardır. Örneğin; TEIn ile arsin veya fosfin arasında oluşabilecek parazit tepkimeleri önlemek için azota gereksinim vardır. Karbon birikintisini önlemek için de hidrojenli bir ortam gereklidir.

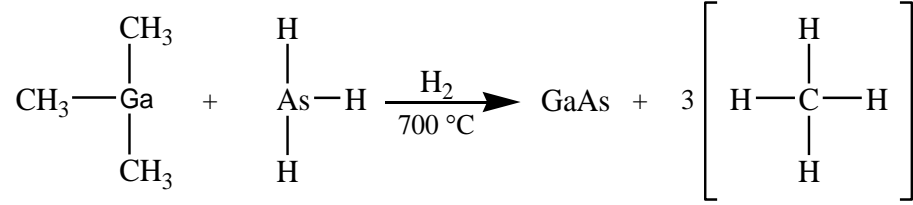
Çizelge 3.5 MOCVD sisteminde yaygınca kullanılan III-V grubu önkaynaklar.

Bileşğin ismi	Kısa adı	Amaç		
Trimetilalüminyum	TMAI	Al	III elementi	
Trietilalüminyum	TEAl			
Trimetilgalyum	TMGa	Ga		
Trietilgalyum	TEGa			
Trimetilindiyum	TMIn	In		
Trietilindiyum	TEIn			
Etildimetilindiyum	EDMIn			
Amonyak	NH ₃	N		V elementi
Fosfin	PH ₃	P		
tert-butilfosfin	TBP			
Arsin	AsH ₃	As		
Trimetilarsin	TMA _s			
Trietilarsin	TEA _s			
Dietilarsinhidrit	DEA _s			
tert-butilarsin	TBA _s			
Trimetilantimon	TMSb	Sb		
Trietilantimon	TESb			

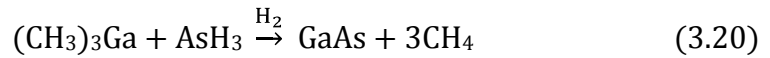
Çizelge 3.6 MOCVD sisteminde, n- ve p- tipi katkılama için kullanılan bazı önkaynaklar.

Bileşğin ismi	Kısa adı	Amaç	
Hidrojenselenür	H ₂ Se	Se	n-tipi
Hidrojensulfür	H ₂ S	S	
Silan	SiH ₄	Si	
Disilan	Si ₂ H ₆		
Tetrametilkalay	TMSn	Sn	
Tetraetilkalay	TESn		
Dimetilçinko	DMZn	Zn	p-tipi
Dietilçinko	DEZn		
Dietilberilyum	DEBe	Be	
Dimetilkadmiyum	DMCd	Cd	
Bis-siklopentadienil magnezyum	Cp ₂ Mg	Mg	

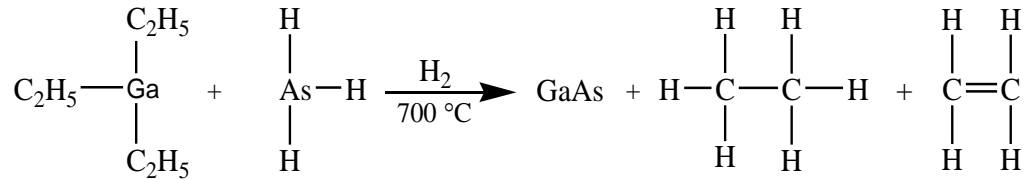
Somut bir örnek olarak, 700 °C civarı bir sıcaklıkta, GaAs veya Si gibi uygun bir tek kristal alttaş üzerine epitaksiyel GaAs tabakası büyütülmesini inceleyelim. Genellikle galyum (Ga) için trimetilgalyum ((CH₃)₃Ga) ya da trietilgalyum ((C₂H₅)₃Ga), ve arsenik (As) için arsin (AsH₃) önkaynakları taşıyıcı gaz olarak hidrojen (H₂) kullanılarak reaktör odasındaki alttaşın üzerine yönlendirilir ve burada ısıyla ayrıştırılarak alttaşın üzerine biriktirilmesi sağlanır. İstenmeyen yan ürünler ve tepkime vermeyen ürünler ise pompalama sistemiyle uzaklaştırılır. Bu kimyasal süreç şöyle yazabilir:



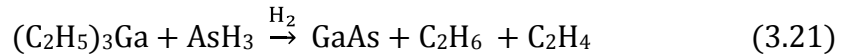
veya



ifade edebilir. Ayrıca trietil önkaynağı için de



veya şu şekildedir:



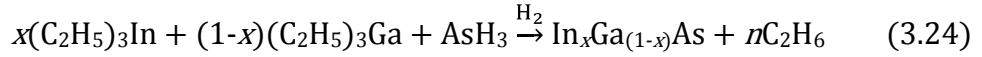
Bu tarz reaksiyonlar tüm III-V yarıiletkenleri için şöyle genellenebilir:



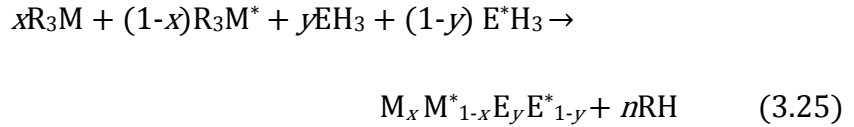
Burada M; alüminyum, galyum, indiyum gibi III grubu elementi E; antimon, fosfor, arsenik gibi V grubu elementi R ise trimetil $(\text{CH}_3)_3$ ya da trietil $(\text{C}_2\text{H}_5)_3$ köküdür. Bu ifade, olası herhangi bir ara adım ihmal edilerek reaksiyonun son halinin basitleştirilmiş bir formudur. Yukarıdaki genelleme ikili yarıiletkenler içindi. Üçlü ve dördü yarıiletkenler içinse şöyledir:



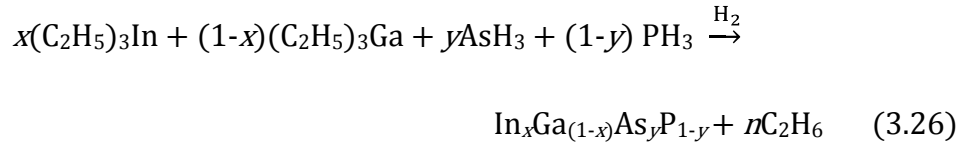
Şeklinde bir genelleme verilebilir. Mesela üçlü $In_xGa_{(1-x)}As$ sistemi



şeklindedir, ve benzer şekilde dördü bileşikler için de;



genellemesi verilebilir. Mesela $In_xGa_{(1-x)}As_yP_{1-y}$ sistemi aşağıdaki gibidir.



Şayet, yukarıdaki gibi (üçlü ve dördü) birden fazla reaksiyon söz konusu ise; alaşım kompozisyonu x ve y ; reaksiyonların bağıl oranına, gaz difüzyonuna, gaz dinamiklerine, bilinmeyen olası ara adımlara ve bazen de termodinamiklere bağlı olarak değişebilir. Çalışma esnasında bir veya daha fazla reaktantın taşıyıcı gazı tükenebilir veya önkaynaklar boru hattında yoğunlaşarak kütle-transferi verimli bir şekilde gerçekleşmeyebilir. Bu problemlerin sonucunda, daha düşük büyüme oranı ve alaşım kompozisyonunda istenmeyen değişiklik olasıdır. Piroliz bölgesine ulaşmadan önce önkaynaklar arasında da tepkimeler gerçekleşebilir ve hatta reaktör geometrisinden kaynaklanan özel reaksiyonların gözlenmesi de olasıdır. Bu ve benzer durumlar büyütme kalitesine ve kompozisyon oranına zarar verebilmektedir.

III grubu alkileriyle V grubu hidritlerinin kullanılması bazı problemleri de beraberinde getirir. Çünkü bu iki tür, büyütme bölgesine aktarılırken kendi aralarında

ön-reaksiyonlar verebilir. Reaktör içindeki alkil ve hidrit önkaynaklar arasında gerçekleşen reaksiyon genellikle şöyle tanımlanabilir:



M-E bağının kuvvetliliği R_3M-EH_3 kompleksinin kararlılığının bir ölçüsüdür. Ludowise bu reaksiyon için dört olası durum belirtmiştir:

- a) Herhangi bir reaksiyon oluşmaz
- b) Uçucu (*volatile*) bir bileşik oluşur
- c) Uçucu olmayan (*non-volatile*) bir bileşik oluşur
- d) Ek reaksiyonlar sonucu uçucu olmayan bileşikler oluşur

İlk iki durum (a ve b) pek önemli değildir. Çünkü gaz aktarımı hâlâ arzulandığı gibi devam etmektedir. c ve d durumlarında ise uçucu olmayan ürünler oluştuğu için, bir veya daha fazla reaktantın taşıyıcı gazı tükenebilir, ve sonuçta daha düşük bir büyüme oranı veya alaşım kompozisyonunda istenmeyen bir değişiklik söz konusudur.

3.5.1. III Grubu Önkaynaklar

Kaynama noktası çok yüksek ve dolayısıyla buhar basını çok düşük olduğu için III grubu elementlerini doğrudan büyütme bölgesine gaz formda taşınamaz. Bu yüzden, bu elementlerin buhar basınçları makul seviyelere getirebilmek için ilgili kaynakların çeşitli organik formlarını kullanılmaktadır.

Özellikle, MOCVD'nin gelişiminin ilk yıllarında trimetil ve trietil materyaller yaygınca kullanılmakta idi. Alkil kök büyük olduğunda (örneğin trietil (C_2H_5)₃) nispeten bileşenleri arasındaki bağ kuvveti zayıftır ve dolayısıyla ayrışma sıcaklığı düşüktür. Bununla birlikte aynı büyütmedeki diğer önkaynaklara nazaran erken ayrışan böyle bir önkaynağın, gaz fazda parazit reaksiyonlar yapma olasılığı

yüksektir. Trimetil ((CH₃)₃) örneğinde olduğu gibi, alkil kök küçükse daha kararlı bir yapıya sahip olduğu için ayrışma sıcaklığı yüksektir ve dolayısıyla büyüme sıcaklığı değişiklik arz eder. Trimetil kaynaklar, daha yüksek buhar basıncına ve daha kararlı bir yapıya sahip oldukları için sıklıkla tercih edilir. Durum böyle olmakla birlikte, bu genellemeyi yapmak aslında pek doğru değildir. Zira bu kaynakların tercihi büyütme sürecine, yarıiletken ailesine (antimon, arsenik, fosfor, nitrit) ve kristal büyütücüsüne göre değişiklik arz edebilmektedir.

TEAl, TEGa ve TEIn gibi trietil alkilerin kararlılıkları oldukça azdır. Özellikle TEIn'un muhafaza kabında bile ayrıştığı gözlemlenmiştir. Dahası, atmosferik-basınç MOCVD reaktörlerinde TEIn, AsH₃ veya PH₃ gibi V grubu hidritleriyle tepkime vererek altaştan üst kısımlarında uçucu olmayan adduct'lar oluşturduğu anlaşılmıştır (Stringfellow, 1985). Bununla birlikte, düşük basınç MOCVD (~ 0,1 atm) reaktörlerinde TEGa ve TEAl kullanarak GaAs ve AlGaAs büyütümünde fark edilebilir derecede karbon konsantrasyonunda azalma sağlanmıştır (Kuech ve ark., 1986). Çünkü bunlar piroliz olurken fazlasıyla reaktif CH₃ kökleri üretmezler. Genellikle CH₃ epitaksiyel tabakalardaki karbon bulaşıklığının ana kaynağı olarak kabul edildiği için dikkat edilmesi gereklidir. Sonraki zamanlarda, TEGa'dan bile daha düşük termal kararlılığı olan Triizobutilgalyum (TIBGa) kullanılarak GaAs büyütülmüştür (Plass ve ark., 1988).

İndiyum kaynağı için çoğunlukla trimetilindiyum (TMIn)'a başvurulmaktadır. TMIn kullanımıyla, TEIn kullanılmasında karşılaşılan problemlerden kaçınılabilir. TMIn kullanımı ile AP-MOCVD sistemdeki parazit reaksiyonlar gayet azalmıştır. Ancak, TMIn da problemsiz değildir. Oda sıcaklığında katı olduğu için TMIn'un buharlaşma oranı tekdüze değildir. Ayrıca patlamaya meyillidir.

Düzgün olmayan buharlaşma oranını daha iyi kontrol edebilmek için sıvı önkaynaklar tercih edilir. Ayrıca, bu kaynakların sadece oda sıcaklığı civarında sıvı halde bulunmaları yeterli olmamakla birlikte aynı zamanda hem uygun buhar

basıncına sahip olmalı hem de kimyasal özellikleri bakımından kararlılığını hâlâ koruması gerekmektedir.

Daha verimli bir başlangıç materyali oluşturabilmek için daha az yan reaksiyonları olan TMIn ile sıvı halde kullanılan TEIn'u birleştirerek yeni bir bileşik olan etildimetilindiyum (EDMIn) denenmiştir. EDMIn oda sıcaklığında sıvıdır ve 17 °C de buhar basınç 0,85 Torr'dur. EDMIn kaynakları ilkin, yeterince saf olmasa da daha sonralarda saflık seviyesi artırılarak cazip bir In kaynağı olmuştur (Knauf ve ark., 1988).

Önemli olan bir diğer III grubu elementi alüminyumdur. Alüminyum fazlaca reaktif olduğundan karbon ve oksijen ile kolaylıkla tepkime verdiği için Al içeren yarıiletkenlerin büyütümü daima zor olmuştur (Stringfellow, 1985). Özellikle TMAI önkaynağı kullanıldığında problem oluşmaktadır. Çünkü TMAI piroliz edildiğinde alüminyum karbür oluştuğu için büyütülen filme karbon bulaşması kaçınılmazdır. TEAl ve TIBAl önkaynaklar kullanılarak karbon bulaşması azaltılabilir. Ama bunların oda sıcaklığında düşük buhar basıncına sahip olmaları MOCVD için bir dezavantajdır. Zira yoğunlaşmayı önlemek için sistemin ısıtılması gerekmektedir. Bu ekstra ısıtmalar sistemin kompleksliğini daha da artırmaktadır. Ek olarak, bu bileşikler arzulanan bir önkaynak olabilmesi için yeterince kararlı değildirler. İlâveten lâyıkıyla gerçekleşmeyen pirolizler sonucu alttaşın üst kısmındaki duvarda birikintilere neden olur ki bu da verimliliği tehdit eden unsurlardandır (Kuech ve ark., 1986). Hatta bu birikintiler düzgünce temizlenmezse bir diğer büyütme için istenmeyen bir önkaynak gibi davranacaktır. TIBAl oda sıcaklığında, muhafaza kaplarında bile ayrıştığı gözlemlenmiştir.

Mevcut Al önkaynaklarındaki problemleri aşmak için uygun özellikte yeni moleküller geliştirilmektedir. Yeni bir önkaynak olan DMAIH'in 25 °C'de 2 Torr'luk makul bir buhar basıncına sahip olduğu ve 250 °C'de pirolizelediği anlaşılmıştır (Bhat ve ark., 1986). Auger elektron spektroskopisi (AES) ve ikinci iyon kütle spektroskopisi

(SIMS) teknikleriyle analiz edilen filmlerde karbon kirliliğın daha az olduğu görölmüştür. Dolayısıyla DMAIH ile mükemmel epitaksiyel AlGaAs tabakaları üretilebilir. Yalnız, büyütölen tabakaların yaklaşık olarak $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ düzeyinde bir n-tipi özelliği mevcuttur. Bu durum DMAIH kaynağındaki Si ve S safsızlıklarının bulunmasından oluşmaktadır. Fotolüminesans verileri, DMAIH ile büyütölen AlGaAs filmlerindeki karbon konsantrasyonun TMAI kullanılarak büyütölen AlGaAs tabakalarına nazaran hatırı sayılır derece düşük olduğunu göstermiştir.

III grubu alkilerin tamamı piroforiktir. Havayla ve suyla temas ettiklerinde güçlü tepkimeler yaparlar. Oda sıcaklığında, TMIIn ve Cp_2Mg beyaz katıları haricinde, geriye kalan alkilerin büyük çoğunluğu renksiz sıvılardır. Buhar formda, TMAI hariç diğer alkiler monomeriktir (TMAI dimeriktir). Alkiler oksijen ile kolaylıkla reaksiyona girebildiklerinden dolayı inert bir atmosferde veya vakum altında işlenmelidir. Yeterince saf alkiler piyasada bulunmaktadır. Laboratuvarlar ortamında, saflık seviyesini koruyabilmek için, yapılan işleme prosedürleri ve ölçümler titizlikle gerçekleştirilmelidir. Bununla birlikte, önkaynakların saflığını artırmak için ayrımsal damıtma teknikleri bulunsa da genellikle çoğu laboratuvarlarda, önkaynaklar teslim alındığı gibi kullanılır.

Organometaliklerin buhar basıncı, erime noktası, termal kararlığı vb. fizikokimyasal özelliklerini uyarlamada, daha sadece birkaç adım işlendi. Uygun özelliklere sahip değişik tür önkaynaklar yoğun bir şekilde araştırılmaktadır. Plass ve ark., (1988) başlangıç materyali olarak triizobutilgalyum (TIBGa)'u devreye sokmuştur, fakat kaynaktaki safsızlıklardan dolayı sonuçta oluşan tabakaların fazlaca n-tipi olduğu görölmüştür. Farklı bir alternatif kaynak girişimi ise şöyledir; hem III hem de V grubu elementi için tek bir kaynağa sahip olmak amacıyla araştırmalar yapıla gelmiştir. Ek bir As kaynağı kullanmaksızın $(\text{ClMe}_2\text{Ga-AsEt}_2)_2\text{CH}_2$ ve $(\text{C}_6\text{F}_5)_3\text{Ga-AsEt}_3$ kullanarak başarılı bir şekilde GaAs tabakalar büyütölmüştür (Maury ve El Hammadi, 1988). Doğal olarak, bu bileşiklerle sadece ikili materyaller büyütölebildiğinden daha sofistik yapılar büyütölememektedir. Mori ve ark. (1988)

yukarıda anılan önkaynaklardan farklı olan $\text{Ga}(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{Cl}$ önkaynağını kullanarak epitaksiyel tabakalar büyütebilmeyi başarmıştır. Görüldüğü üzere, daha verimli bir sonuç elde edebilmek amacıyla, yoğun bir şekilde uygun niteliklere sahip önkaynaklar sürekli olarak araştırılmaktadır.

3.5.2. V Grubu Önkaynaklar

Genel olarak, güvenli bir büyütme ortamı sağlamak için ve arsenik, fosfor vb. V-grubu elementleri makul fizikokimyasal özelliklere sahip olmadığı için bu elementlerin doğrudan büyütme süreçlerinde kullanılması uygun görülmemektedir (Bath ve ark., 1986). Bu yüzden bu elementlerin hidrit veya organik formları kullanılmaktadır.

III-V grubu epitaksiyel büyütme tekniklerinde kullanılan kimyasallar genellikle fazlaca zehirli ve/veya kolaylıkla tutuşabilen bir tabiattadır. Özellikle, arsin (AsH_3) ve fosfin (PH_3) gibi hidritler aşırı derecede zehirlidir. Arsinin ve fosfinin eşik-düzye değerleri sırasıyla 0,05 ppm (milyon başına parçacık sayısı) ve 0,3 ppm'dir. Bunlar, özel basınçlı silindirlerde muhafaza edilir (Arsin ve Fosfin için 20 °C'de buhar basınçları sırayla 14 bar ve 41 bar'dır). Aşırı derecede zehirli olan bu materyaller kaza yoluyla çok kısa bir zamanda tüm çevreye yayılabilir. Bubbler değişimi başta olmak üzere bu materyallerin kullanımlarında son derece titizlik gösterilmelidir. Bu yüzden arsin ve fosfin kullanılırken, operatörleri emniyete almak için ve ürünlerin çevreye salınımını önlemek için oldukça pahalı ve çok hassas cihazlar kullanılmaktadır.

Emniyet kaygılarını gidermek için daha güvenli alternatif kaynaklar arzulanmaktadır. Bir takım V grubu organometalikler aynı grubun hidritlerine göre daha az zehirlidir. Bu V grubu organometalik kaynakların bir diğer avantajı ise; makul buhar basınçlı sıvılar olmasıdır. Ayrıca bu organometalik kaynaklar diğerlerine (V grubu hidritleri) nazaran bubbler'lardan yayılmada yaklaşık olarak iki kat daha

yavaştır. Bu durum kontrol gücünü artırmaktadır ve dolayısıyla çalışma ortamı için potansiyel tehlikelerin azalmasını sağlamaktadır.

Arsenik için yaygın olarak arsin kullanılmaktadır. Bununla birlikte, araştırmalar fazlaca zehirli olan arsine alternatif önkaynaklar bulma üzerine yoğunlaşmıştır. Bu araştırmaların bir sonucu olan organoarsenik materyaller, daha düşük buhar basıncına ve daha yüksek eşik değer düzeyine sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı materyallerin işlenmesinde daha emniyetli bir ortam oluşmaktadır. Trimetilarsenik (TMAs) ve trietilarsenik (TEAs) yaygın olarak kullanılan başlıca organoarseniklerdir (Fujita ve ark., 1988; Razeghi, 1989). Fakat bu organik kaynaklarla büyütölen film tabakalarına karbon bulaşmasının oldukça fazla olması önemli bir problem teşkil ettiği için dikkat edilmesi gereklidir. Aynı zamanda epitaksiyel tabakaların morfolojisi mükemmellikten fazlasıyla uzaktır.

Bu problemlerin üstesinden gelebilmek için; tertiaributilarsin (TBAs) (Tanaka ve ark., 1989); izobutilarsin (IBAs) (Lum ve ark., 1987), dimetilarsin (DMAsh) (Chen ve ark., 1989), dietilarsin (DEAsH) (Bath 1987) ve fenilarsin (PhAsH₂) (Brauers ve ark., 1988) gibi çeşitli materyaller kullanılagelmiştir. Bunlardan bazıları, özelliklede TBAs ve PhAsH₂ ümitkâr sonuçlar göstermiştir. Üst kısımda andığımız bu organoarsinlerin ekserisi piyasalarda mevcuttur. Ayrıca karbon problemine ek olarak, bu kaynakların limitli saflıkta ve yüksek fiyatlarda olması sıralayabileceğimiz diğer dezavantajlarıdır.

Önemli olan bir diğer V-grubu elementi fosfordur. Fosfor için yaygın olarak fosfin önkaynağı kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bu önkaynağın fazlaca zehirli olan atıklarından dolayı fosfor kaynağı için farklı alternatiflerin geliştirilmesine başvurulmuştur. Başlangıçta, trimetilfosfat (TMP) ve trietilfosfat (TEP) kullanılarak deneyler icra edilmiştir (Benz ve ark., 1982). Ama bunlar yüksek termal kararlılığa

sahip oldukları için büyütme odasına alınmadan önce özel bir fırın içinde ön-kırma (*precracked*)^{*} yapılması zorunlu olduğu için pek tercih edilmezler.

Tertiariütilfosfin (TBP) ve izobütilfosfin (IBP) gibi daha büyük olan organofosforlar daha iyi büyütme sonuçları vermektedir (Kurtz ve ark., 1989). Özellikle TBP daha uygun bir buhar basıncına sahiptir ve fosfinden (PH₃)'den birkaç yüz derece daha düşük sıcaklıklarda pirolizlendiği bilinmektedir (Chen ve ark., 1986). Bu özellik, dörtlü yarıiletkenler (InGaAsP örneğinde olduğu gibi) büyütülürken avantajlıdır. Çünkü bu tür karmaşık yapıların büyütülebilmesinde kullanılan önkaynakların termal kararlılıklarının birbirine yakın olması gerekmektedir. Yani, hemen hemen aynı skalada piroliz reaksiyonlarını gerçekleştirmelidirler. Ayrıca, TBP'nin zehirliliği PH₃'e kıyasla çok daha düşüktür (Stringfellow, 1989). Bu özelliklerinden ötürü TBP gayet cazip bir önkaynak olarak tercih edilmektedir.

MOCVD tekniği ile III-V bileşikleri büyütümünde kullanılan bir diğer alternatif önkaynak adduct'tır. Adduct'ın kısaca tanımını yaparsak; elektron-alıcı bir molekül olarak davranan (Lewis asit)^{**} MR₃ gibi III grubu bir alkil ile elektron-verici bir molekül olarak davranan (Lewis baz)^{***} ER₃ gibi V grubu bir alkilin bir araya gelmesiyle oluşan yapıdır. Bu ifadeyi şöyle genelleyebiliriz:



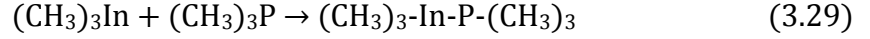
InSb ve GaAs büyütümünde, önkaynak olarak hem III grubu hem de V grubu elementleri için adduct kullanma fikri Harrison ve Tompkins (1962) tarafından ileri sürülmüştür. InP büyütme için TMin-TEP ve TMin-TMP gibi asit-baz adductlar

* Büyütme odasına alınmadan önce termal olarak ayrıştırmak.

** Lewis, asidi, elektron çifti alıcısı olan bir kimyasal tür olarak tanımlanmıştır.

*** Lewis, bazı, elektron çifti vericisi olan bir kimyasal tür olarak tanımlanmıştır.

kullanılmıştır (Wolfram ve ark., 1989). Bu adductları kullanarak AP-MOCVD’de InP büyütülürken karşılaşılan parazit reaksiyonlarının giderilmesi amaçlanmıştır. InP büyütümü sürecinde gerçekleşen tepkimeyi



şeklinde yazabiliriz. Hatırlanırsa, InP büyütümünde In için metalorganik önkaynaklar (TMIn, TEIn) ve P için de fazlasıyla problemlili olan fosfin (PH_3) önkaynağı kullanılmaktaydı. Bu durumu aşmak için böyle bir değişikliğe başvurulmuştur.

Genelde, V- alkilerin aynı grubun hidritlerine nazaran Lewis bazları daha kuvvetli olduğu için, daha önce değinilen* III grubu alkileri ile V grubu hidritleri arasında gerçekleşen ön-reaksiyonları uygun bir tarzda engellemek için kararlı adductlar kullanılabilir.

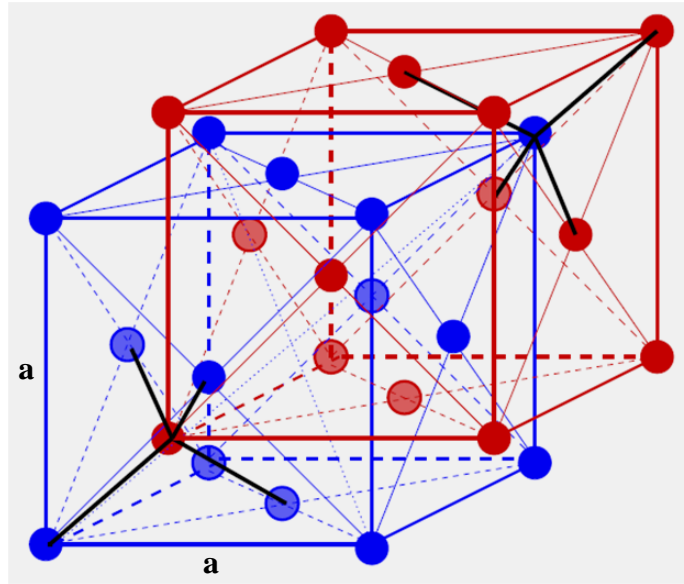
Bugün kullanılan trimetil ve trietil alkiler; yüksek saflıkta iyileştirilmiş ve daha emniyetli işleme imkânları sunduğu için bunların kullanımında adduct'lara nazaran çok daha az problemlidir. Ama yine de, bazı laboratuarlarda adductlar kullanılarak; yüksek saflıkta InP, GaInAs-InP kuantum kuyu yapıları büyütülmektedir (Lee ve ark., 1988; Wolfram ve ark., 1989). Büyütülen bu filmler, tabaka kalitesi ve zemin katkılama düzeyi bakımından, aynı büyütme şartlarında alkil kullanımlı büyütmelemlerle hemen hemen aynı özelliklere sahiptir.

* Ludowise’in önerisi, (d) maddesi.

4. III-V GRUBU YARIİLETKENLER

4.1. İkili (*Binary*) Yarıiletken Bileşikler

Çeşitli aygıtların yapımında yaygın olarak kullanılan GaAs, GaP, InAs, InP, AlAs gibi III - V yarıiletken bileşiklerin ekseriyeti çinko sülfid (*zinc-blende*) kristal yapısına sahiptir (Şekil 4.1). Çizelge 4.1’de bazı III - V bileşiklerin bant aralığı (yasak enerji bandınının değeri), örgü parametresi, dielektrik sabiti, iletim bandı etkin kütlesi gibi özellikleri verilmiştir. Bu ikili yarıiletkenler genellikle alttaş olarak kullanılmaktadır. Böyle bir alttaş üzerine farklı bant aralığına sahip malzemeler büyütülerek ilginç özellikli yeni yapılar üretmek mümkündür.



Şekil 4.1 Çinko sülfid (*zinc-blende*) kristal yapısı. Aslında bu yapı, iki farklı tür element barındıran ve ilk element için birinci fcc kafesinin (mavi renkte olan) cisim köşegeninden çeyrek uzaklıktan ($1/4, 1/4, 1/4$) itibaren diğer element için ikinci fcc kafesinin (kırmızı renkte olan) yer almasıyla oluşur. Siyah çizgilerle gösterildiği gibi bir türün her atomu en yakın dört tane diğer tür atomla tetrahedral bağ yapar.

Çizelge 4.1 Bazı III-V yarıiletken bileşiklerin özellikleri (300 K'de). Burada m_0 elektronun durgun kütlesi, m_e iletim bandının etkin kütlesi, m_{hh} ve m_{lh} ise sırayla ağır ve hafif değerlik bantlarına ait etkin kütlelerdir. D ve I bant geçiş tipinin sırayla direkt ve indirek geçişli olduğunu göstermektedir. Bu bileşiklerin tümü çinko sülfür örgü yapısına sahiptir.

İkili bileşik	Örgü sabiti a (Å°)	Bant aralığı E_g (eV)	Dalga boyu λ (µm)	Bant tipi	Kırılma indisi n	Etkin kütle m_e/m_0	Etkin kütle m_{hh}/m_0	Etkin kütle m_{lh}/m_0	Dielektrik sabiti ϵ/ϵ_0	Elektron afinitesi χ (eV)
InSb	6.47937	0.17	7.3	D	4.0	0.0145	0.44	0.016	17.7	4.69
GaSb	6.09593	0.73	1.70	D	3.820	0.044	0.33	0.056	15.7	4.03
AlSb	6.1335	1.58	0.75	I	3.4	0.39	0.5	0.11	14.4	3.64
InAs	6.0584	0.36	3.5	D	3.520	0.022	0.41	0.025	14.6	4.45
GaAs	5.65321	1.42	0.87	D	3.655	0.065	0.45	0.082	13.1	4.5
InP	5.86875	1.35	0.92	D	3.450	0.078	0.8	0.012	12.4	4.4
AlAs	5.6622	2.16	0.57	I	3.178	0.11	-	0.22	10.1	-
AlP	5.451	2.45	0.52	I	3.027	-	0.63	0.20	-	-
GaP	5.45117	2.26	0.55	I	3.452	0.35	0.86	0.14	11.1	4.0

4.2. Üçlü (*Ternary*) Alaşımalar

Bir yarıiletkenin elektronik ve optik özelliklerini değiştirmek için bant aralığının istenilen düzeye ayarlanmasına “Bant-aralığı Mühendisliği” olarak bilinir. Bunu başarmak için materyal sayısı 3. veya 4. türlerin eklenmesi ile arttırılır. Genellikle 3. tür bant aralığını değiştirmek için, 4. tür ise örgü uyumunu sağlayabilmek için kullanılır. Örneğin bir ikili bileşiğe III grubundan veya V grubundan birden çok element ilave edilmek suretiyle III-III-V veya III-V-V üçlü alaşımlar geliştirilebilir. Bu alaşımlarda yaygın olarak şöyle bir notasyon kullanılmaktadır: $III_xIII_{1-x}V$ ve $IIIIV_yV_{1-y}$ yani III grubu için x ve V grubu için y indisi kullanılır. Buradaki alt indisler teorik olarak $0 \leq x \leq 1$ ve $0 \leq y \leq 1$ aralığında değişebilir ve ilgili maddenin alaşımdaki yüzdesini ifade eder. Somut bir örnek olarak $GaAs_{0,08}Sb_{0,92}$ alaşımını ele alalım ($GaAs_ySb_{1-y}$, $y=0,08$). Bu sistemde ortalama olarak her yüz V grubu elementinin 8’ini arsenik (As) 92’sini antimon (Sb) oluşturur. Denklem (1.1)’de gösterildiği gibi üçlü bileşiklerin bant aralığı $E_g(x)$; x kompozisyonuna bağlı olarak değişmektedir ve ampirik olarak çeşitli düzeltmeler yapılarak $E_g(x)$ bulunabilir. Örneğin;

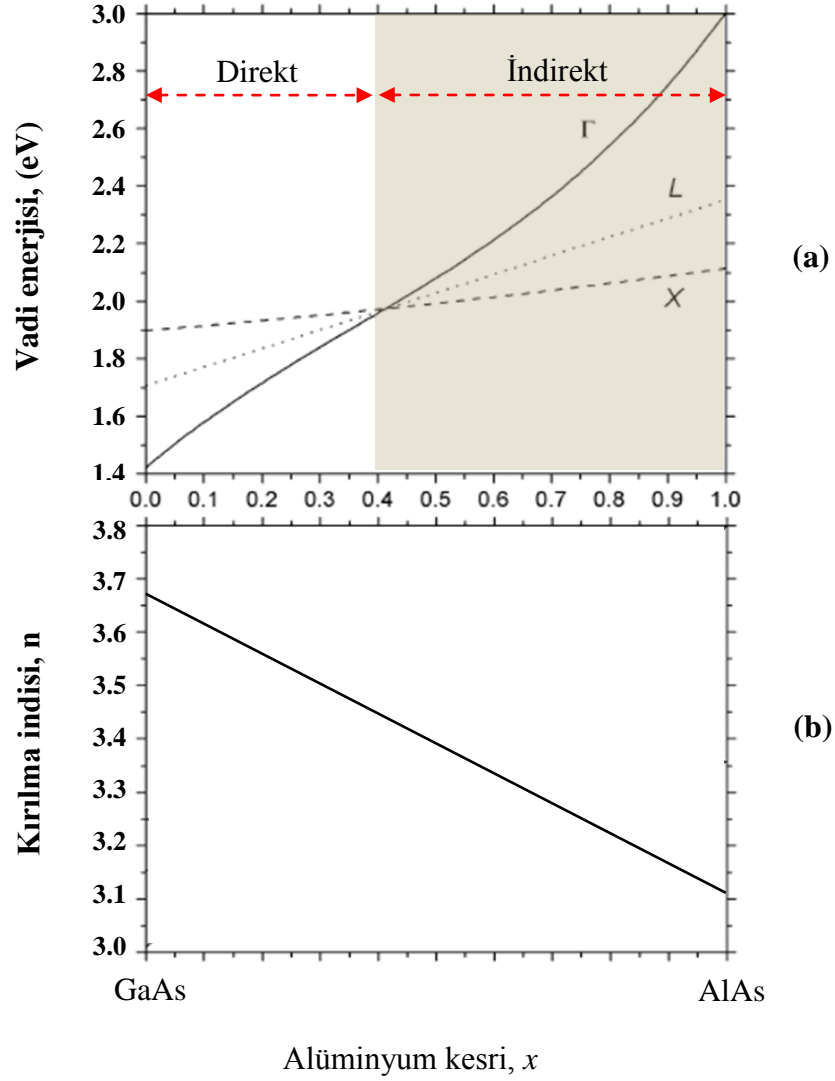
$$E_g(x) = E_g(0) + bx + cx^2 \quad (4.1)$$

Burada $E_g(0)$, bant aralığı daha düşük olan ikili bileşiğin yasak enerji bandının değeridir ve c eğrilik (*bowing*) parametresidir. Eğrilik parametresi olan c teorik olarak belirlenir. x kompozisyonu, sadece E_g ’yi değiştirmeyip aynı zamanda yeni alaşımın örgü sabitini, bant tipini ve kırılma indisini de etkilemektedir. Üçlü alaşımların örgü sabiti a Vegard yasasıyla ifade edilir. Vegard yasası şu şekildedir:

$$a_{\text{alaşım}} = x a_A + (1 - x) a_B \quad (4.2)$$

Burada a_A ve a_B sırasıyla ikili A ve B alaşımlarının örgü sabitleridir. Vegard yasası III-V üçlü alaşımlarının çoğuyla uyumlu bir şekilde çalışır. 300 K’de çeşitli III-V

üçlü alaşımlarının enerji aralıklarının kompozisyonuna bağımlılığı Çizelge 4.2’de gösterilmektedir (Casey ve Panish, 1978).



Şekil 4.2 (a) 300 K’de, $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ yapısında, kompozisyonun bir fonksiyonu olarak iletim bandı vadilerinin değişimi. Burada Γ vadisi direkt, L ve X vadileri indirektir. Dikkat edilirse, ilkin iletim bandının çukuru Γ vadisi iken takriben $x=0.4$ değerinden sonra artık iletim bandının çukuru X vadisi olmaktadır. (b) Alaşımın kırılma indisi.

GaAs ile AlAs bileşiklerinin örgü parametrelerinin hemen hemen aynı olması AlGaAs üçlüsünün problemsiz bir şekilde üretilmesini mümkün kılmıştır. Bununla beraber yapıdaki Al konsantrasyonuna bağlı olarak bant tipi değişmektedir. Kompozisyondaki Al atomlarının mol kesri takriben %40 ($x=0,4$) değerinin üzerine çıktığında, oluşan yeni yapının bant tipi indirek olacaktır (Piprek, 2003) Bu durum özellikle optoelektronik aygıtlar için bir dezavantaj oluşturduğu için dikkat edilmesi gerekmektedir. Şekil 4.2’de bu yapının iletim bandı vadilerinin ve kırılma indisinin kompozisyona bağlılığı ifade edilmektedir (Sze, 1981).

Çizelge 4.2 300 K’de, çeşitli III-V üçlü alaşımlarının enerji aralıklarının kompozisyona bağlılığı (Casey ve Panish, 1978).

Üçlü alaşımlar	Bant aralığı E_g (eV)
$Al_xGa_{1-x}As$	$E_g(x) = 1,424 + 1,247x$
$Ga_xIn_{1-x}As$	$E_g(x) = 0,360 + 1,064x$
$Al_xGa_{1-x}Sb$	$E_g(x) = 0,726 + 1,139x + 0,368x^2$
$Al_xIn_{1-x}Sb$	$E_g(x) = 0,172 + 1,621x + 0,43x^2$
$Ga_xIn_{1-x}P$	$E_g(x) = 1,351 + 0,643x + 0,786x^2$
$Al_xIn_{1-x}As$	$E_g(x) = 0,360 + 2,012x + 0,689x^2$
$Ga_xIn_{1-x}Sb$	$E_g(x) = 0,172 + 0,139x + 0,145x^2$
GaP_xAs_{1-x}	$E_g(x) = 1,424 + 1,15x + 0,176x^2$
$GaAs_xSb_{1-x}$	$E_g(x) = 0,726 - 0,502x + 1,2x^2$
InP_xAs_{1-x}	$E_g(x) = 0,36 + 0,891x + 0,101x^2$
$InAs_xSb_{1-x}$	$E_g(x) = 0,18 - 0,41x + 0,58x^2$

4.3. Dörtlü (*Quaternary*) Alaşımlar

Farklı bant aralığına sahip ikili ve üçlü alaşımlarla heteroyapılar oluşturmak oldukça önemlidir. Ancak bu tür yapılarda karşılaşılan bir takım eksiklikleri giderebilmek için dördüncü bir elementin katılması kaçınılmaz olmuştur. Bu ve benzer durumlar, dörtlü alaşımların doğmasına neden olmuştur. Örneğin InP alttaşı üzerine $Al_xGa_{1-x}As$ tabakaları büyütülürken karşılaşılan gerginliği azaltmak için az miktarda P eklenir. Bu dörtlü alaşım $Al_xGa_{1-x}P_yAs_{1-y}$ şeklinde ifade edilir. InP / $Al_xGa_{1-x}P_yAs_{1-y}$ heteroeklemi örgü-uyumlu ikili-dörtlü sistemine örnek olarak verilebilir.

A ve B; III grubu elementi C ve D; V grubu elementi olmak üzere $A_xB_{1-x}C_yD_{1-y}$ dörtlü alaşımını AC, AD, BC ve BD ikili alaşımlarının karışımı olarak değerlendirebiliriz. a_{AC} AC'nin, a_{AD} AD'nin, a_{BC} BC'nin ve a_{BD} BD'nin örgü parametresi olmak üzere $A_xB_{1-x}C_yD_{1-y}$ dörtlü alaşımını örgü parametresi için kullanılan bağıntı Denklem 4.3 ile verilmiştir (Razeghi, 1995).

$$a_{A_xB_{1-x}C_yD_{1-y}} = xy a_{AC} + x(1-y) a_{AD} + (1-x)y a_{BC} + (1-x)(1-y) a_{BD} \quad (4.3)$$

Dörtlü alaşımların bant aralığını hesaplamak çok daha zordur. Ancak eğrilik parametresi c 'yi ihmal ederek ikili alaşımların bant aralıklarının doğrusal değiştiğini varsayarak $A_xB_{1-x}C_yD_{1-y}$ dörtlü alaşımının yasak bant aralığı için bir yaklaşım yapabiliriz:

$$E_{g_{A_xB_{1-x}C_yD_{1-y}}} = xy E_{AC} + x(1-y) E_{AD} + (1-x)y E_{BC} + (1-x)(1-y) E_{BD} \quad (4.4)$$

Burada E_{AC} AC'nin, E_{AD} AD'nin, E_{BC} BC'nin ve E_{BD} BD'nin bant aralığıdır. Yukarıdaki iki formülde de görüldüğü gibi x ve y kompozisyon oranını değiştirerek a ve E_g değiştirilebilir. Ayrıca, bu kompozisyon oranları yasak banttaki geçişlerin direkt veya indirekt olmasını da belirler. Çizelge 4.3'de çok tabakalı heteroyapılar için örgü-uyumlu III-V grubu bazı ikili ve dörtlü sistemler verilmiştir.

Çizelge 4.3 Çok tabakalı heteroyapılar için örgü-uyumlu III-V grubu bazı ikili ve dördü sistemler (Casey ve Panish, 1978). Burada ikili bileşikler alttaş olarak kullanılarak bunların üzerine dördü alaşımlar büyütülür.

Dördü alaşımlar	İkili bileşikler	Dalga boyu λ (μm)
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}_y\text{As}_{1-y}$	GaAs	0,8-0,9
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$	InP	1
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$	InAs	3
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$	GaSb	1,7
$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}_y\text{Sb}_{1-y}$	InP, GaSb, AlSb	2
$\text{In}(\text{P}_x\text{As}_{1-x})_y\text{Sb}_{1-y}$	AlSb, GaSb, InAs	2-4
$(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_y\text{In}_{1-y}\text{Sb}$	AlSb	1,1-2,1
$(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_y\text{In}_{1-y}\text{P}$	GaAs, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	0,57
$(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_y\text{In}_{1-y}\text{As}$	InP	0,8-1,5
$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}_y\text{As}_{1-y}$	GaAs, InP	1-1,7

4.4. III-N'ler

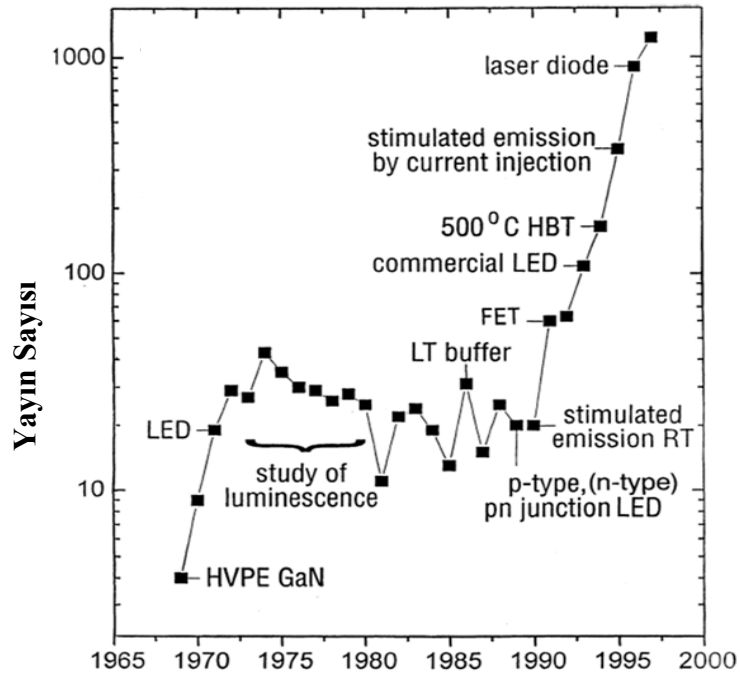
4.4.1. Tarihçe

IIIA grubu elementleri ile azotun (N) yaptığı bileşikler, kısaca III-N şeklinde kısaltılabilir. Önemli özelliklerinden dolayı III-N'ler çok aktif bir araştırma konusudur. Sağlık sanayi, biyolojik arıtma ve algılama, savunma sanayi, radar ve uydu sistemleri, uzay-havacılık, yeni nesil iletişim sistemleri, otomotiv, yüksek kapasiteli kayıt ortamları, güneş pilleri ve aydınlatma gibi birçok ticari ve askeri alanda kullanılan çeşitli elektronik ve optoelektronik aygıtların yapımında yaygın olarak tercih edilmektedir.

1968 yılında Manasevit'in MOCVD kristal büyütme tekniğini tanıtmasının hemen ardından III-N grubu çalışmaları hız kazandı, 1971 de Manasevit Safir altaş ve SiC üzerine GaN büyüttü. Değişik gruplar tarafından yürütülen ilk çalışmalarda elde edilen numunelerde kristal kalitesi hiç iyi değildi ve çok yüksek oranda kristal kusurları içermektedirler. Bu durumun temel sebeplerinden biri; kullanılan altaşların örgü sabitlerinin ve ısısal genleşme katsayılarının GaN ile oldukça farklı olması idi. Çözülmesi gereken bir diğer problem ise; katkılanmadan yetiştirilen GaN'ın elektron fazlalığından dolayı n-tipi davranması ve p-tipi bir katkı maddesinin ise bilinmemesiydi. Tüm bu zorluklar, III-N grubu malzemeler ile yapılan araştırmaların çok yavaş ilerlemesine hatta GaAs araştırmalarının hızla yükseldiği bir dönemde gerilemesine neden olmuştur. Yıllara göre III-N yapılarında yapılan yayın sayılarının INSPEC verileri 1990'lara kadar süren, bu durağan dönemi açıkça göstermektedir (Şekil 4.3). Bu durağan dönemin temelinde uygun bir alt taş bulunamaması ve p-tipi katkılama yapılamaması yatmaktadır.

1983'de Yoshida ve arkadaşları MBE ile büyütülen numunelerde altaş olarak kullanılan safir üzerine ince bir AlN tek kristal tabakası büyüttüklerinde elektron mobilitesinin yükseldiğini gözlemlediler. 1986'da ise Amano ve arkadaşları OMVPE

yöntemi ile düşük sıcaklıklarda, alttaş üzerine ince bir AlN tampon tabakası yetiştirdiklerinde numunelerin, yüzey morfolojilerinin iyileştiğini gösterdiler. Başından beri yılmadan III-N çalışmalarına büyük katkıları ile bilinen ve Pankove ile birlikte III-N araştırmalarının öncüsü olarak nitelenen, Akasaki ve arkadaşları, bu tampon tabaka ile kristal kalitesinin iyileşmesinin yanı sıra fotoluminesans ve elektriksel özelliklerin de iyileştirdiğini göstererek, tampon tabakanın GaN üzerindeki etkisini detaylı bir şekilde açıklamıştır.



Şekil 4.3 Yıllara göre GaN ile ilgili yayınların dağılımı.
Kaynak: INSPEC, Keyword=GaN.

Özetle, Akasaki tampon tabakasının, alttaş ile GaN tabakaları arasındaki arayüzey serbest enerjisini azalttığını ve safir üzerinde çekirdek merkezleri (*nucleation centers*) oluşturduğunu, bunun sonucunda da GaN büyümesinin alışlagelmiş tabaka tabaka ya da ada büyüme modlarından daha farklı olduğu

sonucuna varmıştır. Bu yöntem hızlıca AlGaN ve GaInN ile de denenmiş ve olumlu sonuçlar alınmıştır. Daha sonra Nakamura düşük sıcaklık GaN tampon tabakaları ile de kristal kalitesinin ve elektriksel özelliklerinin iyileştiğini göstermiştir. Artık Safir alttaşlar üzerinde kaliteli III-N büyütmenin önündeki önemli engeller kısmen aşılmıştır.

III-N'lerdeki tüm bu gelişmelere rağmen, cihaz yapımı önünde önemli diğer bir engel olan p-tipi katkılama yapılamamaktaydı. Yarıiletkenlerin katkılanması, elektronik ve optoelektronik cihaz yapımı için hayati öneme sahiptir. Genellikle geniş bant aralıklı elementlerin katkılanması ve katkı miktarının kontrolü oldukça zordur. Bunun temel nedeni, bant aralığı geniş olduğundan gerek alıcı gerek verici atomların enerji düzeylerinin derinde olmasıdır. Öyle ki, oda sıcaklığında, ısısal enerji bunların iyonize olmaları için yeterli değildir. Katkılama olmaksızın büyütülen GaN numunelerin düşük n-tipi katkılanmış gibi davrandığı gözlenmiştir. Bunun sebebi olarak çeşitli görüşler öne sürülmesine rağmen teorik çalışmalar, oksijen kirlenmesinden oluştuğuna işaret etmektedir.

Katkılama tipi kadar katkılama seviyesinin ayarlanabilir olması da ileri aygıtlar için bir hayli önemlidir. Genellikle, III-V grubu bileşiklerini n-tipi yapmada alışlagelmiş yöntem Si katkılamadır. Son zamanlarda MOCVD tekniğinde, silan (SiH_4) önkaynağı ile n-tipi katkılama yaygınlaşmıştır. Ayrıca, gelişmiş MOCVD akış kontrol mekanizmaları sayesinde 0 katkılamadan 10^{19} cm^{-3} oranına kadar lineer katkılamanın yapılabilir olması da oldukça önem arz etmektedir. p-tipi katkılama ise; çok ilginç bir tesadüf sonucu 1986 da Akasaki ve arkadaşları tarafından bulunmuştur. OMVPE yöntemi ile büyüttükleri GaN numunelerde bis-siklopentadienil magnezyum (Cp_2Mg) kullanarak p-tipi katkılama yapmayı amaçladılar, ancak yaptıkları ölçümler olumsuz sonuç verdi. Daha sonra numunelerin yapısal incelemelerini yaparken SEM (Taramalı elektron mikroskobu) analizi yaptıktan sonra tekrar katkılamayı ölçtüklerinde p-tipi katkılamanın gerçekleştiğini gördüler. Daha sonraki çalışmalar ile bunun düşük enerjili elektron ışınları ile yüzeyin bombardıman edilmesi sonucu

gerçekleştiği sonucuna vardılar. Bu engelin aşılmasının hemen ardından ilk p-n eklem LED yapılarak bu konuda önemli bir mesafe kat ettiler. Daha sonra, Nakamura p-tipi katkılamanın azot atmosferinde ısıl iyileştirme (*thermal annealing*) ile de elde edilebileceğini gösterdi. Bu noktadan sonra Şekil 4.3'ten de görüldüğü üzere III-N çalışmalarının önündeki büyük engeller aşıldı ve yayın sayısında üstel bir artış yakalandı.

Büyük bir ivme ile devam eden çalışmalar sonucu birçok elektronik ve optoelektronik devre elemanı geliştirilerek teknolojik uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. Bunlardan belki de en önemlisi, 1995 yılında Nakamura tarafından rapor edilen ilk mavi LD'dir. Yüksek kapasiteli optik veri saklama endüstrisinin uzun zamandır beklediği bu önemli buluş ile ilgili çalışmalar büyük bir ivme kazanmıştır. Araştırmacıların önünde duran önemli uygulamalardan birisi de AlGaIn tabanlı UV LD üretmektir. III-N grubu ile elde edilecek elektronik elemanlar günlük ışık kaynağı, süper-yüksek-yoğunluklu veri kayıt ortamları, biyolojik algılama ve tıbbi tedavi alanlarına kadar çok geniş kullanım alanlarına sahiptir.

Yukarıda verilen kısa literatür özetinden de anlaşılacağı üzere uzun yıllardan beri bu konuda çalışan gruplarca, III-N çalışmaları için temel engeller aşılmış ve çok geniş bir uygulama alanı ortaya çıkarılmıştır. Bununla birlikte, daha aşılması gereken sayısız güçlükler vardır. Öte yandan bu malzemelerin düzlemde kutuplu (polar) yapıda olmaları, bu alandaki teorik çalışmaları zorlaştırmakta, deneysel çalışmalarda ise hedeflenenenden daha az verimli aygıtlara neden olmaktadır. Ayrıca, yeni alttaş arayışları, farklı kristal doğrultularında büyütme, farklı büyütme teknikleri, çoklu tampon tabakalar gibi arayışlar ve iyileştirmeler de sürekli olarak devam etmektedir.

4.4.2. III – N'lerin Diğer Yarıiletken Ailelerine Göre Önemi

Çağımıza damga vuran en önemli gelişme silisyum (Si) yarıiletkenlerin teknolojiye kullanılmaya başlamasıdır demek çok büyük bir abartı olmaz. Nitekim önemli sayıda

yazarın yirminci yüzyıla Si çağı demesinin temel nedeni de budur. Silisyum maliyeti, üretimi, termal iletkenliği, mekanik dayanıklılığı, büyük boyutlarda wafer yapabilme, kolay elektronik aygıt yapabilme vb. çeşitli avantajlarından dolayı günümüz yarıiletken teknolojisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, çok önemli avantajlara sahip olmakla birlikte indirekt bant tipine ve dar bant aralığına sahip olması önemli bir dezavantaj oluşturmaktadır. Optik süreçlerde verimi olumsuz yönde etkileyen bu durum ayrıca taşıyıcıların yeniden birleşmesinde, örgüye önemli oranda ısı vermektedir. Bu durum yeni malzeme arayışlarını büyük bir hızla artırmıştır. Direkt geçişli malzemeler ve bunların sahip oldukları geniş bant aralıkları Si teknolojisinde boş kalan alanları doldurmaya açık adaylardır. Bu alanda en önemli adaylar, III-V grubu malzemeleridir. Bu grubu aşağıdaki gibi antimon (Sb), fosfor (P), arsenik (As) ve azot (N) ailesi olarak ele alabiliriz:

Antimon (Sb) ailesi:

Birçok alttaş üzerine kolaylıkla büyütülebilir. Antimon tabanlı yarıiletkenlerin bant aralığı oldukça küçüktür (0.17-1.58 eV). Bu özelliğinden dolayı optoelektronik aygıtlar için pek tercih edilmez. Bununla birlikte termal kameralarda kullanılabilir.

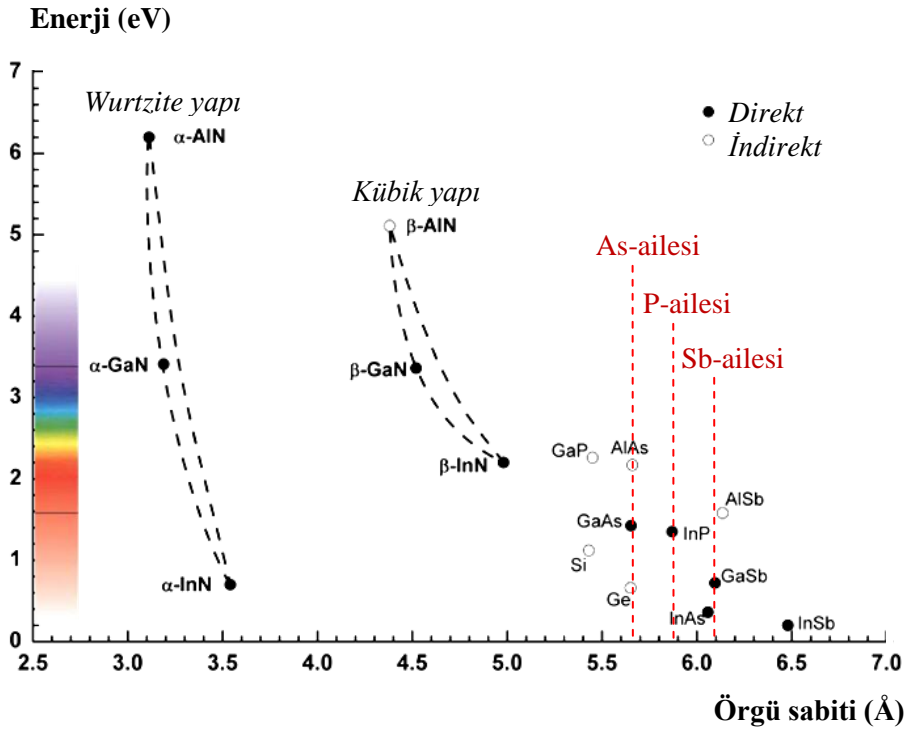
Fosfor (P) ailesi:

Genellikle InP alttaş üzerine örgü-uyumlu olarak büyütülür. Üçlü ve dörtlü sistemlerin kompozisyon oranlarına göre E_g takriben 0.75-1.35 eV yelpazesinde olabilir. Ancak bu sistem diğer yarıiletken ailelerinden biraz farklıdır. Çünkü bu sistemin üçlü ve dörtlü alaşımları InP yarıiletkenine nazaran daha düşük olduğu için elektronlar ve deşikler, üçlü ve dörtlü alaşımlarda kuşatılır.

Arsenik (As) ailesi:

Genellikle GaAs alttaş üzerine büyütülür. üçlü ve dörtlü alaşımlarının kompozisyonuna göre yeni sistemin yasak enerji aralığı (E_g) 1.43-2.3 eV arasında değişebilir. Bu üçlü ve dörtlü sistemlerin her ikisi de ikili GaAs kristaline göre daha

büyük bir E_g 'ye sahip olduğu için, bu tür heteroyapılarda, yük taşıyıcıları (elektronlar ve deşikler) GaAs tabakası içerisinde kuşatılır. Bu yapının birçok üstünlüğü olmasına rağmen önemli bir dezavantajı vardır. Alaşımdaki alüminyumun ağırlığına göre bant tipi değişmektedir. Yaklaşık olarak $x>0,4$ değerlerinde alaşım indirekt olmaktadır. Bu durum geniş bant aralığı gerektiren opto-elektronik aygıtlar için kullanılamayacağı anlamına gelir.



Şekil 4.4 III-V grubu yarıiletken aileleri.

Bu sistemler, yüksek frekans cihazlarında ve kızılötesi-sarı bölgedeki optoelektronik uygulamalarda kullanılmaktadır. Ancak bu malzemeler mavi ve üzeri (UV) bölgedeki optoelektronik uygulamalarda kullanılamaz. Bu boşluğu doldurmak için en iyi aday N-ailesidir. Şekil 4.4'de görüldüğü gibi, geniş bant aralığı ve yüksek kırılma gerilimine (*high breakdown field*) sahip olması nedeni ile III-N tabanlı

malzemeler ilgi odağına yerleşmiştir. Bu özelliklerinden ötürü yüksek sıcaklıklarda ve zor şartlarda işlevsel olarak rahatlıkla çalışabilirler. Işıklandırma (LED), görüntüleme (display), DVD oynatıcılar için mavi lazer, yüksek güç mikrodalga devreleri için yüksek elektron mobiliteli transistör (HEMTs) vb. birçok açıdan çok önemli bir nanoteknoloji yapıtaşı konumuna gelmiştir.

4.4.3. Temel özellikleri

III-N yarıiletkenler elektronik ve optoelektronik uygulamalar için büyük bir potansiyele sahiptir. III-N'ler BN dışında hepsi direkt bant tipindedir. Bu malzemeler 0,7 eV'den 6,2 eV'a kadar uzanan geniş direkt bant aralıklarına ve güçlü atomlar arası bağlara sahiptir. Bu yüzden bu malzemeler, kırmızı-morötesi bölgedeki optoelektronik uygulamalarda kullanılabilir. Yüksek sıcaklıklara ve zor çevre şartlarına karşı daha toleranslıdır. Ayrıca yüksek kırılma gerilimi ve piezo elektrik etkilerinden dolayı yatay taşıyıcı akımının yüksek güçlerde ve frekanslarda kontrol edilebilmesi, bu yapıların önemini bir hayli arttırmıştır. Bu malzemeler optoelektronik uygulamaların yanı sıra yüksek frekans/güç uygulamaları (örneğin; HEMT) için de oldukça büyük bir öneme sahiptir.

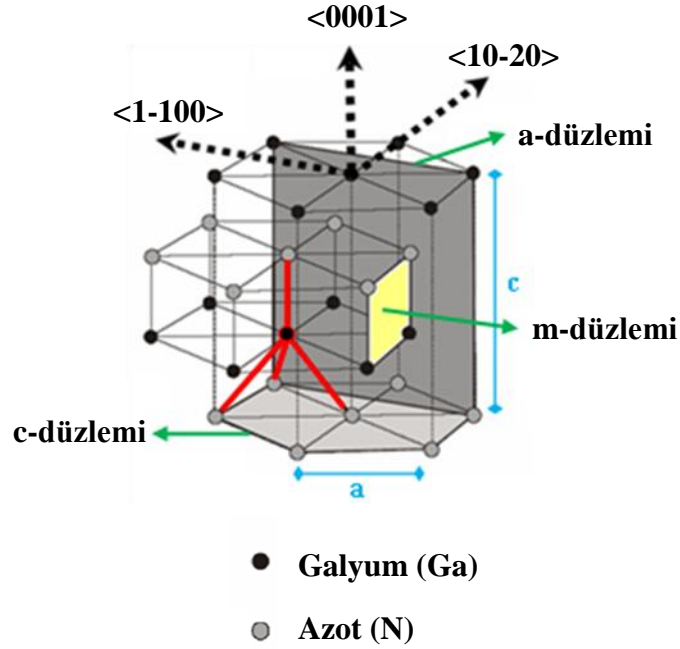
GaN kübik çinko sülfür (ZnS) hekzagonal wurtzite olmak üzere iki farklı yapıda kristalleşebilir (bkz. hekzagonal wurtzite için Şekil 4.5, çinko sülfür için Şekil 4.1). Külçe için, bunlardan termodinamik açıdan en kararlı faz wurtzite yapıdır. Bu nedenle cihaz için bu yapı tercih edilir. Bu yapı, iç içe geçmiş iki tane hekzagonal sıkı paketten (hcp) oluşur. Bu iki alt-örgü biri $5/8c$ 'de yer almaktadır (c : hücre yüksekliği). Şekil 4.5'te hekzagonal GaN'daki kristal düzlemleri ve doğrultuları gösterilmektedir. Wurtzite yapı, altıgen prizmanın taban kenar uzunluğu a , yüksekliği c parametresi ile tanımlanır. Birim hücrenin temel düzlemi (*basal plane*), polar c - (0001) düzlemdir. a -düzlemi ve m -düzlemi olarak belirtilen, sırayla $(11-20)$ düzlemi ve $(1-100)$ düzlemi non-polardır (İmer, 2006).

Çizelge 4.4 Bazı III-N yarıiletkenlerin fiziksel özellikleri (Morkoç, 1999; Meijers, 2007)

Özellik	Birim	GaN	AlN	InN	SiC	GaAs	Si
Bant aralığı	E_g [eV]	3.39	6.20	0.70	3.10	1.43	1.12
Örgü sabiti	a_0 [Å]	3.189	3.112	3.545	3.080	5.65	5.43
	c_0 [Å]	5.186	4.982	5.703	1.511	–	–
Elektron mobilitesi	μ [cm ² /Vs]	1000	135	3200	<400	6000	1350
Optik fonon enerjisi	$\hbar\omega$ [meV]	91.2	99.2	89.0	95.0	33.2	62.9
Erime noktası	T_m [°C]	2500	2750	1100			1410
Elektron afinitesi	χ [eV]	4.20	1.90	–	–	4.07	4.05
Dielektrik sabiti	ϵ	8.9	8.5	15.3	9.6	12.5	11.8
Kırılma alanı *	[MV/cm]	>2.5	–	–	3.5	0.65	0.6

Bu yapıda kristalleşen nitrit yarıiletkendeki metal (In, Ga, Al) ve azot (N) çifti, (0001) yöneliminde ABABAB şeklinde birbirini izleyen sıkı paketli (hcp) formdadır. Her bir grup-III atomu dört tane N atomuyla tetrahedral bağ yapar. N-tabanlı farklı bileşikler, farklı katyonlara ve farklı iyonik yarıçaplara sahip olduğu için doğal olarak bu malzemelerin örgü sabitleri, bant aralıkları ve bağlanma enerjileri de farklı olacaktır. Çizelge 4.4’de wurtzite yapılı nitrit bileşiklerin bazı parametreleri verilmiştir.

* Breakdown Field



Şekil 4.5 Hekzagonal GaN ile ilgili polar ve non-polar kristal düzlemleri ve yönleri. Altıgen prizmanın taban kenar uzunluğu a , yüksekliği c parametresi ile tanımlanır (mavi çizgiler). Böyle bir yapıdaki her bir grup-III atomu dört tane N atomuyla tetrahedral bağ yapar (kırmızı çizgiler).

Öte yandan wurtzite yapı tersinme (*inversion*) simetrisine sahip değildir. Bu nedenle wurtzite yapı malzemeler; metal (In, Ga veya Al) ya da azot (N) polariteye sahiptir. Polarite külçe ve yüzey özellikleri açısından oldukça önemlidir. Örneğin N-polar GaN'ın, Ga-polar GaN'dan kimyasal olarak daha reaktif olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, büyütme tekniğine göre polarite değişebilmektedir. Örneğin, safir alttaş üzerine MOCVD ile büyütülen nitrit malzemeler Ga polariteye sahip iken moleküler demet epitaksi (MBE) ile genelde N polariteye sahip olmaktadır. Fakat GaN büyütmeden önce ince bir AlN tampon tabaka büyütülerek Ga polariteli yapılabilmektedir (Çörekçi, 2008).

4.4.4. III – N’lerde Polarizasyon (Kutuplanma)

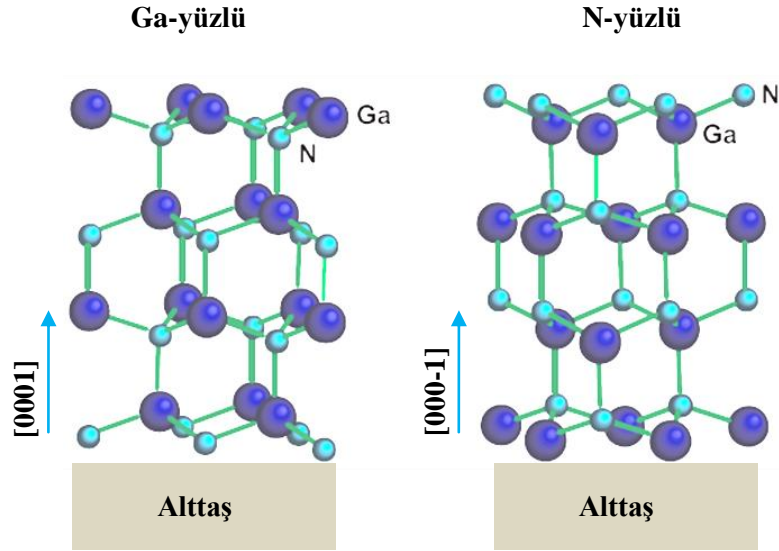
Kendiliğinden (*spontaneous*) polarizasyon (P_{SP}) ve piezoelektrik polarizasyon (P_{PE}) olmak üzere III-N malzemeler iki farklı polarizasyona sahiptir. Kendiliğinden polarizasyon, kristalin tersinme simetrisi eksikliğinden ve iki atom arasındaki bağın tam bir kovalent karakterde olmayışından kaynaklanır. Bu durum, elektron yük bulutunun bağdaki atomların birine doğru yer değiştirmesini sağlar. Dolayısıyla, kristalin tersinme simetrisine sahip olmadığı yönde, böyle bir asimetric elektron bulutu bir yüzeyde net bir (+) yük, diğer yüzeyde ise net bir (-) yük lokalleşmesi oluşturacaktır. Bu tarz oluşan elektrik alanın şiddeti malzemenin kendiliğinden polarizasyon katsayısına bağlıdır. Örnek vermek gerekirse, AlN için bu katsayı -0.081 C/m² değerindedir ve 9.2 MV/cm bir elektrik alan şiddetine karşılık gelir. Nitrit yarıiletkenlerde P_{SP} ; [0001] c eksenini boyunca sabit bir yöne sahiptir ve metal atomundan azot atomuna doğru (+) pozitif olarak belirlenir (Ambacher ve ark, 1999).

Farklı iki malzeme birleştirildiğinde, örgü sabitleri ve termal genişleme katsayılarının farklı olmasından ötürü gerinmelerin (çekme gerinmesi (*tensile*), basma gerinmesi (*compressive*)) olması doğaldır. Piezoelektrik polarizasyon, bu şekilde oluşan gerinmelerden kaynaklanır. Piezoelektrik polarizasyon, kendiliğinden polarizasyonla ya aynı yönde ya da ters yönde ve de daha büyük değerdedir (İmer, 2005).

Şekil 4.6’da görüldüğü gibi, nitrit heteroyapılarda piezoelektrik polarizasyonun yönü büyütülen malzemenin polaritesine ([0001]: Ga-yüzlü ve [000-1]: N-yüzlü) ve de gerinme tipine (çekme veya basma gerinmesi) bağlıdır. Oluşan elektrik alanın şiddeti malzemenin piezoelektrik polarizasyon katsayısıyla orantılıdır. Her iki polarizasyonun (P_{SP} , P_{PE}) da aynı yönde olması durumunda arayüzeyde yüksek taşıyıcı yoğunluğu elde edilebilir (Çörekçi, 2008).

Ayrıca, polarite AlN çekirdeklenme tabakasının kullanımına bağlıdır. Şayet, altaş ile GaN filmi arasında ince bir AlN çekirdeklenme tabakası var ise bu yapı Ga-

yüzlü polariteye sahiptir (Ga atomları üstte). Öte yandan alttaş üzerine doğrudan GaN büyütülmesiyle N-yüzlü polarite elde edilir (N atomları üstte).

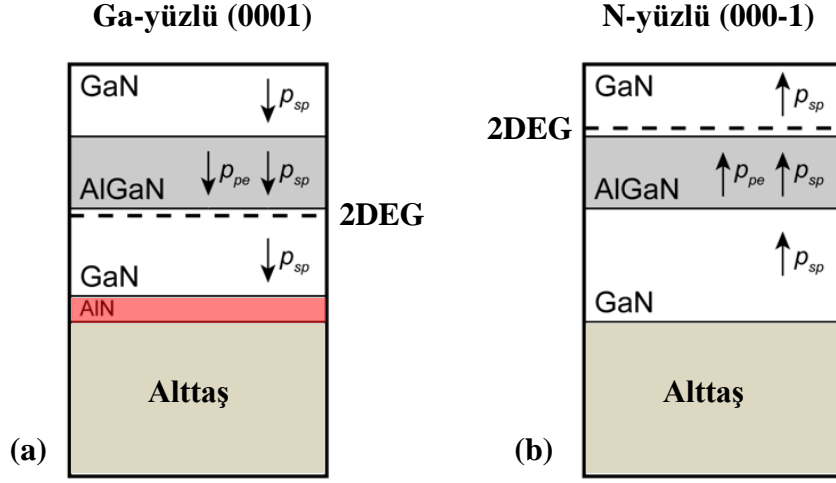


Şekil 4.6 GaN bileşiğinde Ga-yüzlü ve N-yüzlü polarite

Heteroyapının tabakalarındaki polarizasyon, kuantum kuyusunda yüklerin toplanmasına neden olur. AlGaN tabakasındaki toplam polarizasyon, kendiliğinden ve piezoelektrik polarizasyonun toplanmasıyla elde edilir. Şayet, yük yoğunluğundan indüklenen toplam polarizasyon (+) ise, sistemin serbest elektronları bu durumu telafi etmeye kalkışır. Dolayısıyla, bu durum bir 2DEG* oluşumuyla sonuçlanır. Ga-yüzlü polaritede, düzlem yük yoğunluğunun indüklediği pozitif polarizasyon, GaN/AlGaN arayüzeyinde AlGaN tabakasının hemen altında bulunduğu için bu arayüze bitişik GaN tabakasından 2DEG oluşur (Şekil 4.7-a). N-yüzlü polaritede ise, Şekil 4.7-b'de görüldüğü gibi, toplam polarizasyon Ga-yüzlüye göre zıt yönde

* 2 boyutlu elektron gazı

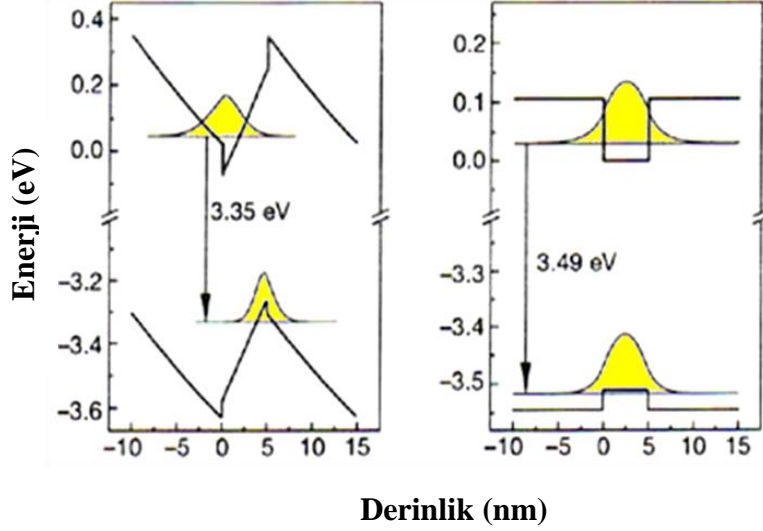
olduğundan, bu kez, üst arayüze bitişik GaN tabakasında 2DEG oluşur (Bernát, 2005).



Şekil 4.7 Ga-yüzlü (a) ve N-yüzlü (b) GaN/AlGaN/GaN heteroyapı da kendiliğinden ve piezoelektrik polarizasyon. Farklı yüzlerde büyütülen yapılarda zıt etkilerin olduğu görülmektedir. Bu zıt etkiden dolayı 2DEG oluşumunun konumu değişmektedir.

Piezoelektrik ve kendiliğinden polarizasyonun yüzünden, III-N'lerin optiksel özellikleri, kuantum sınırlandırılmış Stark etkisiyle (*quantum confined Stark effect* (QCSE)) güçlü bir şekilde hasar görür (Şekil 4.8). Bu etki, emisyon dalga boyunun kaymasına ve emisyon şiddetinde azalmaya yol açar (Waltereit ve ark, 2000). Polarizasyon alanları elektron-deşik ayrılmalarına neden olduğu için, e-h yeniden-birleşme sürecinin olumsuz yönde etkiler. Dolayısıyla bu durum aygıt performansını azaltır. Şekil 4.8'de görüldüğü gibi elektron ve deşik dalgafonksiyonları kuyunun zıt taraflarına itilir ve de ayrılırlar. Farklı k değerlerinde bulunan parçacıkların üst üste gelme olasılıkları azalacağından radyatif yeniden-birleşme oranı düşer. Aynı zamanda, taşıyıcıların kuyu dışına tünelleme olasılığını da artacaktır. Bu durum, taşıyıcıların yaşam süresinde bir azalma ve soğurma spektrumunun genişlemesine

sebebiyet verecektir. Sonuç olarak, optik geçişlerin daha düşük şiddette ve kırmızıya doğru kayması* kaçınılmaz olur (Bhattacharya, 1997).



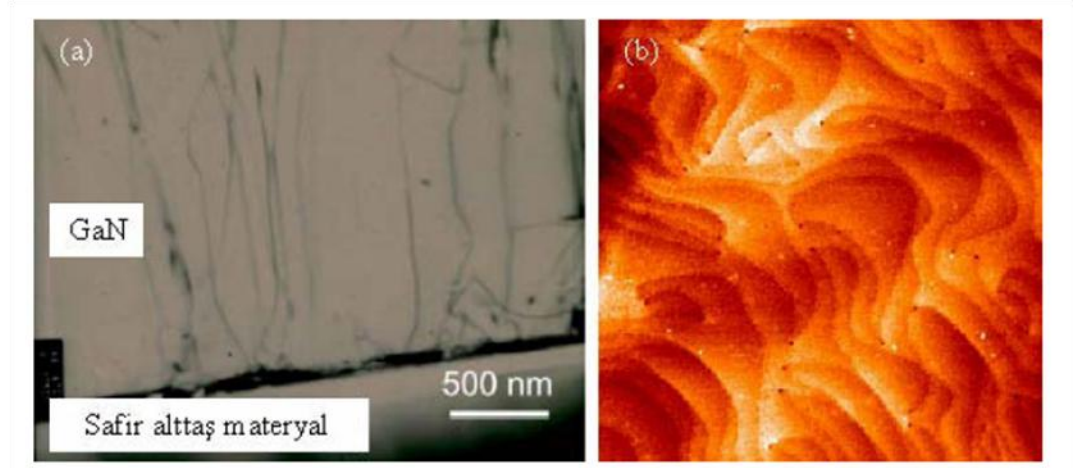
Şekil 4.8 Polarizasyon varlığında, polar c-düzlemi GaN/AlGaN SQW bant şeması (a), ve polarizasyon yokluğunda, m- veya a-düzlemi bant şeması (b)'nin karşılaştırılması. Dikkat edilirse, polarizasyondan ötürü E_g 'de ve dalga fonksiyonunun biçiminde bozulma olur (Waltereit ve ark, 2000).

III-N'ler genellikle, yabancı alttaş üzerine büyütüldüğü için dislokasyonların olması kaçınılmazdır. Büyütülen filmlerde, kenar (edge), vida (screw) ve karışık (mixed) olmak üzere üç tip yiv (threading) dislokasyona sıklıkla rastlanır. Kenar tipi dislokasyonların elektron saçılmasını önemli ölçüde artırdığı ve vida tipi dislokasyonların ise ışımsız birleşme merkezleri olarak davrandığı bilinmektedir.

* Burada kırmızıya doğru kaymadan (red-shifted) kasıt, foton yayılımının kırmızı renkte değil, polarizasyon olmadığı duruma göre daha büyük dalgalı boylarında yani daha küçük frekanslarda foton yayılmasının olmasıdır. Bu durum, ayrıca, Şekil 4.8-a' nın daha düşük bir E_g 'ye sahip olmasından da görülebilir.

Şekil 4.9’da GaN filminden alınan TEM görüntüsü ve MOCVD ile safir alttaş üzerine büyütülen GaN malzemenin AFM yüzey görüntüsü bulunmaktadır (Çörekçi, 2008).

Toparlarlarsak, yoğun kusurlar ve iç elektrik alanla ilişkili polarizasyon III-N aygıtlar için önemli kısıtlamalardır. Wurtzite yapının c-ekseni yönünde, polarizasyonundaki kesiklilikten dolayı iç elektrik alan bulunmaktadır. Bu durum ve kusurlar, yukarda değinildiği gibi aygıt verimine zarar veren önemli etmenlerdir. Dolayısıyla, III-N aygıtların verimini artırabilmek için değinilen sorunların iyileştirilmesi gerekmektedir.



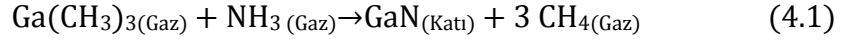
Şekil 4.9 III-N’lerde sıklıkla rastlanan dislokasyonlar. (a) Safir/GaN kesit alanı TEM görüntüsü. Bu resimdeki çizgiler kenar tipi dislokasyonlardır. (b) Safir alttaş üzerine büyütülen GaN’ın AFM yüzey görüntüsündeki vida tipi dislokasyonlar (Çörekçi, 2008).

4.4.5. Büyütme ve Alttaşlar

Optoelektronik cihaz üretiminde oldukça başarılı ileri bir teknik olan MOCVD daha önce incelenmişti. Bu tekniğin, hızlı ve eşzamanlı olarak çok sayıda wafer büyütebilme özelliği ticari açıdan başarısını daha da yükseltmektedir. Aslında, III-

N'lerin MOCVD ile büyütümü diğer yarıiletken ailelerine göre pek farklı değildir. Bununla birlikte, amonyak (NH₃)'ın ayrışması ve de III-N'lerin bileşik oluşturabilmesi için yüksek sıcaklıklarda çalışılmaktadır.

Kısaca özetlersek; uygun sıcaklığa kadar ısıtılan ve düzgün bir film kalınlığına sahip olabilmek için sürekli olarak döndürülen alttaş üzerine taşıyıcı bir gazla önkaynaklar gaz fazda taşınır. Burada taşıyıcı gaz H, N veya her ikisinin karışımı olabilir. Taşınan önkaynakların piroliz reaksiyonları sonrasında ilgili atomlar (grup-III ve azot) alttaş üzerine birikirken diğer atomlar (karbon, hidrojen v.b) sistemden uzaklaştırılır. Böylece epitaksiyel film oluşur. Bu aşamada gerçekleşen kimyasal reaksiyonun aşağıdaki gibi olma ihtimali yüksektir:



Genellikle, azot için amonyak (NH₃), Al için TMAI ya da TEAl, galyum için TMGa ya da TEGa ve indiyum için TMIIn ya da TEIn önkaynakları kullanılır. Büyütülen filmleri polarizasyon-tipi katkılama için (Cp₂Mg) önkaynağından Mg, n-tipi katkılama için (Si₂H₆) önkaynağından Si kullanılır. Bunlar bubbler'lar içerisinde muhafaza edilir (daha detaylı bilgi için Bölüm 3.5'e bakınız).

Reaksiyon sonucunda oluşan atık gazların "Scrubber" adı verilen asit banyolarında tamamen tesirsiz hale gelmeleri ile işlem tamamlanmış olur. Genel işleyişi kısaca özetlenmiş olan MOCVD reaktöründe numune büyütme esnasında dâhili karakterizasyon (in-situ) teknikleriyle ölçüm yapma imkânı maalesef çok kısıtlıdır. Bu neden ile büyütme esnasında elimizdeki tek kontrol mekanizması alttaş yüzeyinden yansıttığımız lazer vasıtası ile bağıl olarak film kalınlığını ölçtüğümüz optik düzenektir.

III-N'lerin büyütümünde karşılaşılan en önemli güçlüklerden biri alttaş malzeme eksikliğidir. Safir (Al₂O₃), III-N büyütmede yoğun olarak kullanılan önemli bir alttaştır. Çizelge 4.5'de olası alttaşların bazı özellikleri verilmiştir. Açıkça

görüldüğü gibi GaN için ideal olan bir alttaş henüz yoktur. Her ne kadar diğer alttaşlar safire göre daha uyumlu örgü sabiti ve ısısal genleşme katsayısına sahiplerse de; safir düşük fiyatı, kolay temini ve daha önemlisi optik geçirgenliği gibi nedenlerle tercih edilmektedir.

Çizelge 4.5 III-N'lerde kullanılan bazı alttaşlar (Cho, 2007).

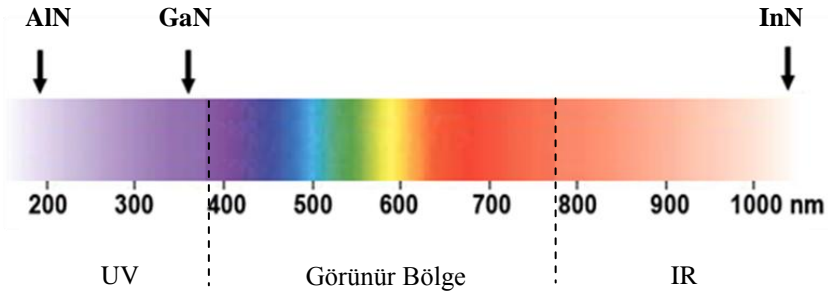
Alttaş	Simetri	Örgü sabitleri (Å)	GaN/Alttaş Uyuşmazlığı (%)	AlN/Alttaş Uyuşmazlığı (%)
GaN (0001)	Wurtzite	a = 3.18	–	-2.4
		c = 5.18	–	–
AlN (0001)	Wurtzite	a = 3.11	2.4	–
		c = 4.98	–	–
α -Al ₂ O ₃ (0001)	Rombohedral	a = 4.75	16	13.2
		c = 12.99	–	–
6H-SiC (0001)	Wurtzite	a = 3.08	3.5	1
		c = 15.12	–	–
Si (111)	Kübik	a = 5.43	-16.9	-18.9

Günümüzde, piyasadan GaN alttaşı temin etmek mümkündür. Doğal olarak, bu alttaşlar üzerinde daha kaliteli epitaksiyel tabakalar büyüebilmektedir, ancak gerek bu alttaşın çok pahalı olması gerekse de alttaş büyüklüğünün çok küçük boyutlarda olması gibi nedenler ile safir hâlâ en önemli alttaş olarak yerini muhafaza etmektedir. Güncel araştırmalarda, SiC alttaşı ile de iyi sonuçlar alınmış ve bu konuda araştırmalar devam etmektedir. İlaveten, önemli sayıda kristal büyütücü grup Si alttaş kullanarak III-N yapılarını büyütmeye uğraşmaktadırlar, eğer uygun tampon

tabaka ya da tabakalar bulunabilirse, bunun çok önemli bir teknolojik gelişmeye yol açacağı açıktır. Çünkü Si teknolojisi ile gelinen bu noktada, çok ucuza çok geniş bir wafer işlenebilir. Dahası, cihaz yapımında Si ile diğer hiçbir alttaş ile kıyaslanamayacak bir bilgi birikimi kullanılmaya hazır durumdadır.

4.4.6. Bazı Uygulama Alanları

Geniş bant aralığına ve yüksek kırılma gerilimine sahip III-N tabanlı heteroyapılı mavi lazer diyot (LDs) ve çok-renkli ışık yayıcı (*Multi Color LEDs*) yapımında çok önemli bir malzeme olup, mavi lazer ve LED yapımına olanak veren yegâne malzemelerdendir. Parlak beyaz renkli ışık kaynaklarının elde edilmesinde son engel olarak görünen mavi ışık yayan LED'lerin yapılmış olması bu malzemenin önemini bir hayli artırmış ve, bu yöndeki çalışmaları daha ucuz üretim yöntemleri ve daha uzun ömürlü aygıt yapımına yönlendirmiştir.



Şekil 4.10 Dalgaboyu spektrumundaki AlN, GaN ve InN yarıiletkenleri.

Şekil 4.10'de görüldüğü gibi, III-N'ler UV, görünür bölge ve IR bölgeyi kaplayan önemli bir materyal ailesidir. InN'dan AlN'a kadar değişen malzemelerle elde edilebilen geniş bir bant aralığı yelpazesi (yaklaşık olarak 0.65 eV - 6.2 eV), araştırmacılara oda sıcaklığında çalışan mavi/morötesi ışık yayan diyot (LEDs) ve lazer diyot (LDs), ve parlak ışık yayıcılar (Bright LEDs) yapma imkânı vermiştir. III-

N yapıları kullanılarak elde edilen mavi LED'ler, beyaz ışık elde etmekte kullanılmaktadır. Bu alandaki çalışmaların çok önemli güç tasarrufuna yol açacağı açıktır. Ayrıca bu ve benzer özellikleri ile güncel teknolojide önemli bir yeri olan; zemin ışıklandırma diye tanımlayacağımız "Back Plane Lighting" ile cep telefonlarında yaygınlaşan parlak ekranlarda, büyük bir hızla ilerleyen LCD TV'lerin parlak ışıklarında ve hatta araba radyoları aydınlatmasında ve benzeri birçok alanda büyük bir ivmeyle kullanılmaktadır.

Yine mavi LD'lerin üretilmesiyle optiksel depolama teknolojisinde uzun zamandır beklenen büyük gelişme gerçekleşmiştir. Aynı ölçüde, Güneş Körü (*Solar Blind*) detektörler yapımına imkân sağlayarak önemli ve stratejik bir alan olan detektör yapımında da çok önemli bir boşluğu doldurmuştur. Yüksek kırılma gerilimi ve bu yapılarda ortaya çıkan piezo elektrik etkilerinden dolayı yüksek güç ve yüksek frekans bölgesinde çalışabilen, Yüksek Elektron Mobiliteli transistörler (HEMTs), Metal Yarıiletken Alan Etkili transistörler (MESFETs), Heteroyapılı Alan Etkili transistörler (HFETs), Eklem Alan Etkili transistörler (JFETs) ve benzeri elektronik elemanların yapılmasını mümkün kılmıştır. Kısaca özetlemek gerekirse, bu materyal grubu elektronikte ve optoelektronikte önemli uygulamalarda kullanılmaktadır ve yapılan her yeni çalışma ile birlikte bu alan, hızla genişlemeye devam etmektedir.

Ayrıca, bu malzemeler sağlık uygulamaları açısından da oldukça önemlidir. UV ışınım yapan aygıtlar, biyolojik ve kimyasal dezenfektasyon işlemlerinde çok önem kazanmıştır.

5. MOCVD İLE BÜYÜTÜLEN III-V TABANLI YARIİLETKEN AYGITLAR

Önceki bölümlerde kısaca epitaksiyel büyütmenin neden önemli olduğu, epitaksiyel büyütme teknikleri ve özellikle de MOCVD tekniği incelendi. Bu bölümde ise önce genel olarak aygıtlara sınıflandıracğız. Bileşik yarıiletken malzemelerden geliştirilen aygıtları iki ana başlıkta toplayıp, bunlardan özellikle MOCVD ile büyütülebilen elektronik ve optoelektronik bazı nano yapıları inceleyeceğiz.

5.1. Elektronik Aygıtlar

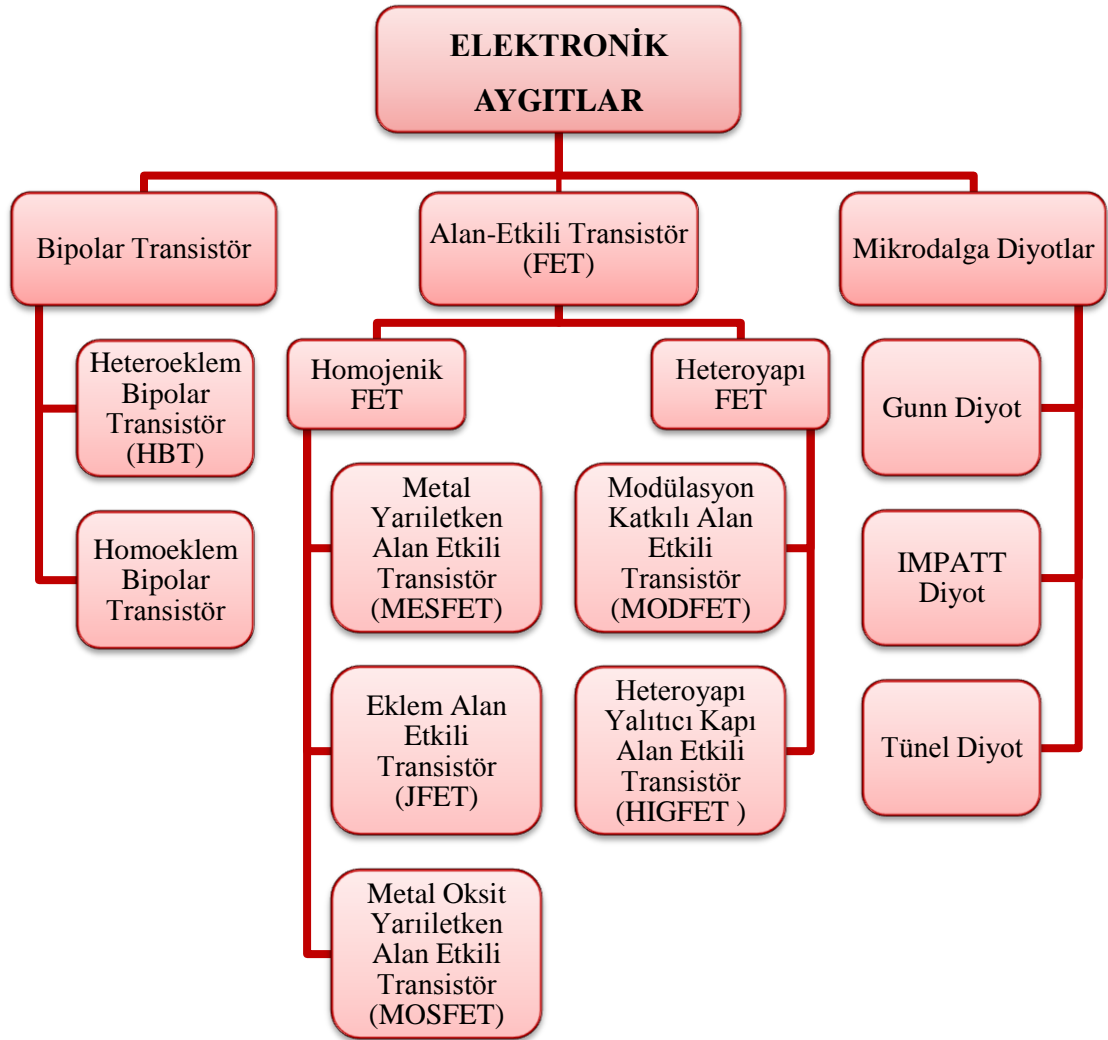
Özellikle yarıiletken tabanlı bazı elektronik aygıtlar Şeki5.1 de verildiği gibi özetlenebilir. Bu yapılar üzerinde kısaca duralım:

İki-kutuplu (bipolar) aygıtlar: Bu aygıtların iletim (*transport*) süreçlerinde hem elektronlar hem de holler rol alır. Bipolar transistörde, iki tane sıkıca birleşmiş p-n eklemının etkileşimi söz konusudur. Birbiri ile etkileşen üç p-n eklemının oluşturduğu (p-n-p-n) çok tabakalı yapıya tristör (*thyristor*) denir. Bu tür aygıtlar yüksek-akım veya düşük-akım durumları arasında hızlı anahtarlama (*fast switching*) elemanları olarak kullanılabilirler.

Tek-kutuplu (unipolar) aygıtlar: Bu aygıtların iletim mekanizmasına baskın olarak tek tip taşıyıcı katılır. Büyük çaplı entegre devrelerde (VLSI) önemli bir yere sahip JFET, (eklem alan etki transistör), MOSFET (metal-oksit yarıiletken alan etki transistör) vb. yüksek hızlı aygıtları bu kategoride verilebilir.

Mikrodalga diyotlar: Tünel diyot, IMPATT diyot ve Gunn diyotu bu kategoride sıralayabiliriz. Bu aygıtlar 300 cm - 0,3 mm aralığındaki dalga boylarına denk 0,6 GHz -1000 GHz aralığındaki frekanslarda çalışabilirler.

Buraya kadar bahsedilen yapılar özellikle silikon teknolojisinin gelişimi ile geliştirilmiş olan yapılardır. Ancak kristal büyütme tekniklerindeki önemli gelişmelere paralel olarak ortaya çıkan yeni aygıt modelleri bu listeyi daha da geliştirmiştir. Özellikle yüksek frekans limitlerini zorlayan yapılar ile THz mertebesinde çalışan aygıtlara, daha küçük hacme sığdırılan nanoyapılar ile ise daha az sarfiyat ile daha hızlı ve güçlü devre elemanları geliştirilmiştir. Bu kategoriye giren önemli devre elemanlarından birisi yüksek elektron mobiliteli transistördür.



Şekil 5.1 Bazı elektronik aygıtlar

5.1.1. Yüksek Elektron Mobiliteli Transistör (HEMT) Yapısı

Daha önce değinildiği üzere farklı E_g değerlerine sahip tabakaların oluşturduğu sistem heteroyapı olarak bilinir. Termodinamiksel dengede, böyle bir yapının Fermi enerji seviyesi (E_F) düz olmalıdır. Katıhal fiziğinin temel ilkesi olan bu “düzleşme” birleşen tabakaların iletim ve değerlik bantlarının eğilmesine yol açar. Bu eğilme ise, kesişim bölgesinde bir üçgensel kuantum kuyu, diğer deyişle 2DEG oluşması ile sonuçlanır.

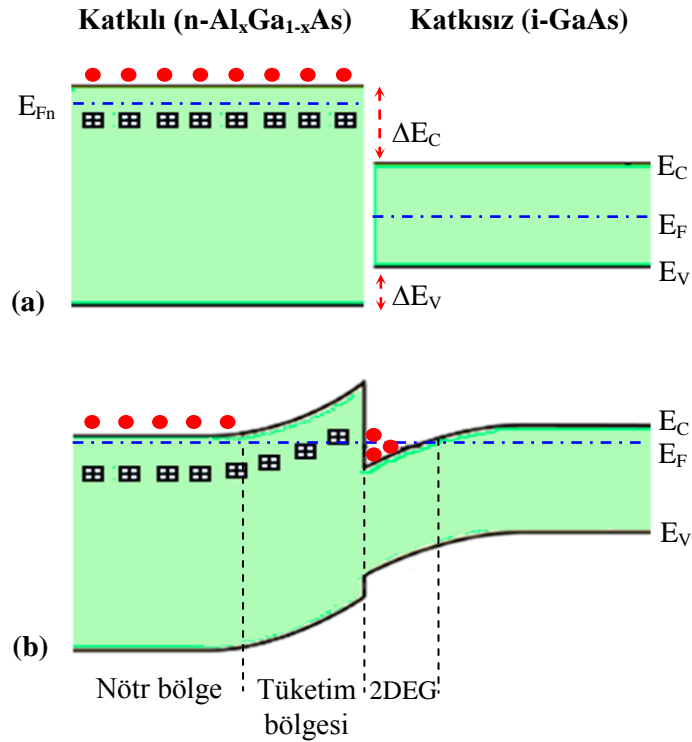
N-tabanlı heteroyapılarda polarizasyon, 2DEG oluşumunda önemli bir rol oynar. MODFET, HEMT vb. birçok önemli aygıtın temelinde 2DEG (veya 2DHG*) olgusu yatmaktadır. 2DEG kaynağı bakımından N-tabanlı heteroyapılar, As-tabanlı heteroyapılardan farklıdır. Örneğin; $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ heteroyapısında 2DEG oluşturmak için modülasyon katkılama işlemi yapılır.

Şekil 5.2’te n-tipi katkılı $Al_xGa_{1-x}As$ tabaka ile katkısız GaAs tabakanın oluşturduğu heteroyapı görülmektedir. Heteroyapının kesişim bölgesinde, termal enerjiye sahip elektronların bir kısmı GaAs tarafına hareket geçer. Geçen elektronlar enerjilerinin bir kısmını kaybettiğinden ΔE_C ’lik potansiyel farkını artık geri aşamazlar. Böyle bir birikme, bandın eğilmesine yol açar. Buradaki elektronlar, üçgensel formdaki bir kuantum kuyusunda tuzaklanır ve kesikli enerji seviyelerinde bulunabilirler. Şekilde görüldüğü gibi Fermi seviyesi elektronların olası enerji durumunun üstünde yer almaktadır. Bu yüzden elektronlar sadece bu seviyesinin altında kesikli enerji düzeylerinde bulunabilirler (Lişesivdin, 2005).

2DEG oluşturmada, As-tabanlı heteroyapıların aksine N-tabanlı heteroyapıların katkılanmasına, genellikle gerek bile yoktur. Zira III-N’lerin güçlü polar tabiatı 2DEG oluşumunu tetiklemektedir. Daha önce değinildiği gibi, GaN

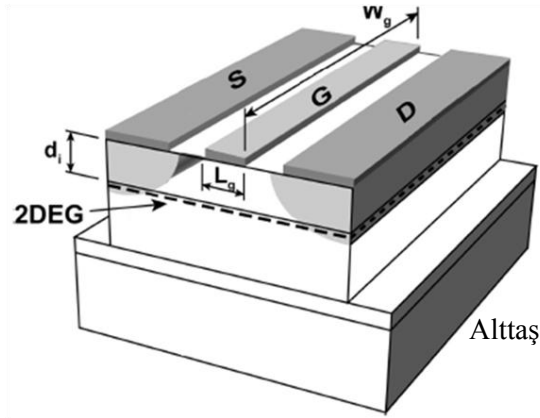
* 2 boyutlu deşik (hole) gazı

kendiliğinden polarizasyona sahip polar bir yarıiletkenidir. GaN tabakası üzerine büyütülen $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ise hem kendiliğinden hem de piezoelektrik polarizasyona sahiptir. Bu iki tabaka arasındaki polarizasyon farkı, arayüzeyde sabit bir pozitif yük meydana getirir. Bu pozitif yük, arayüzeyin diğer tarafında elektronların birikmesine yani 2DEG oluşumuna yol açar. Öte yandan, bu şekilde arayüzey yükü tarafından oluşturulan güçlü elektrik alan, yüksek taşıyıcı yoğunluğu elde edilmesine ve taşıyıcıların daha iyi lokalleşmesine neden olur. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ heteroyapıda $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ bariyerin katkısız olması durumunda bile, arayüzeydeki 2DEG yoğunluğu tipik bir $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ heteroyapıda elde edilen 2DEG yoğunluğunun takriben 4-5 katıdır (Çörekçi, 2008)



Şekil 5.2 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ heteroyapı oluşturulmadan öncesi (a) ve sonrası (b). İlk (a) elektronlar yerlerinde iken sistem yüksüzdür, tabakalar birleştirildiğinde (b), elektronlar termal enerjileri nedeniyle hareket ederek GaAs tarafına geçerler. Sistem termodinamiksel dengeye ulaştığında, GaAs tarafına geçen elektronlar tekrar dönemeyip, burada oluşan üçgensel bir potansiyel kuyuda tuzaklanarak 2DEG oluşur.

Şekil 5.3’de AlGa_N/Ga_N HEMT şeması bulunmaktadır. HEMT’lerde akaç (*drain*) elektrota uygulanan (+) voltaj, elektronların kaynak (*source*) elektrottan akaç elektrota doğru sürüklenmesine neden olur. Kapı voltajı aracılığıyla, 2DEG yoğunluğu değiştirilmek suretiyle akaç akımı da değiştirilir. Başka bir deyişle, kapı voltajı aracılığıyla üçgensel potansiyel kuyu sığlaştırılarak birikim tabakası boşaltılır ya da üçgensel potansiyel kuyu derinleştirilerek birikim tabakası daha fazla doldurulur. Böylece, 2DEG yoğunluğu değiştirilerek akaç-kaynak akımı anahtarlanabilir.



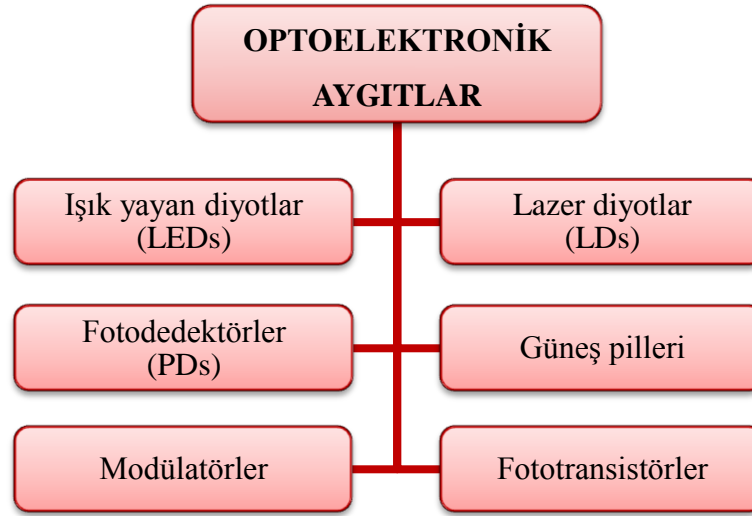
Şekil 5.3 AlGa_N/Ga_N HEMT’in şeması (Bernát, 2005). Burada S: kaynak, G: kapı, D: akaç elektrotudur. Bu yapıda AlGa_N ve Ga_N arasındaki polarizasyon farkı, bariyer yüzeyindeki negatif yüke uygun olarak arayüzde pozitif yük indüklenmesine yol açar. Arayüzeyin diğer tarafında bu (+) yük, üçgenimsi potansiyel bir kuyuda elektronların birikmesine, yani 2DEG oluşmasına yol açar. Kapı voltajı sayesinde üçgenimsi potansiyel kuyudaki birikim yükseltilir veya daha da düşürülür. Bu şekilde 2DEG yoğunluğu değiştirilerek akaç-kaynak akımı anahtarlanır.

Son yıllarda, AlGa_N/Ga_N heteroyapısındaki çok yoğun çalışmaların temel nedenlerinden biri tabaka sistemindeki polarizasyonun 2DEG oluşturacak kadar büyük olmasıdır. Öyle ki, 2DEG çok yüksek düzlem (*sheet*) taşıyıcı konsantrasyona sahip olduğundan, böyle bir sistemde katkılanmış bir tabakaya bile gerek yoktur.

Doğal olarak bu sistem katkılanmadığından, başka bir deyişle tek kristal yarıiletkenin mükemmel periyodikliği bozulmadığından, iyonize safsızlık saçılmaları olmayacaktır. Bu, yarıiletken içindeki taşıyıcılar için oldukça önemlidir. Böyle bir yapıdaki elektronlar, durumunu değiştirmeden (saçılmadan) uzun mesafeli hareket edebilir. Yüksek elektron mobiliteli transistörlerin (HEMTs) temelinde bu olgu yatmaktadır. Elektronik devre elemanlarında yeni büyütme teknikleri ve bu sayede yeni materyal aileleri kullanılarak elde edilen bir çok devre elemanı vardır. Ancak bizim asıl ilgi alanımız optoelektronik devre elemanları olduğundan bu örnek ile elektronik elemanlar üzerindeki gelişmeleri bırakıp, dikkatimizi epitaksiyel kristal büyütme ve yeni materyal arayışlarının optoelektronik devre elemanlarına getirdiği yeniliklere çevirelim.

5.2. Optoelektronik Aygıtlar

Optoelektronik aygıtlar başlıca güneş pilleri, fotodetektörler (PD), yarıiletken ışık-yayan diyotlar (LED), lazer diyotlar (LD) ve optik modülatörler şeklinde sınıflandırılabilir. Optoelektronik ve fotonik aygıtlarda fotonlar önemli bir rol oynarlar. Bu aygıtlar fotonik enerjileri algılayabilir, üretebilir ve hatta elektrik enerjisine dönüştürebilirler veya tam tersini yapabilirler. Optoelektronik aygıtlar şu şekilde sınıflandırılabilirler:



Şekil 5.4 Optoelektronik aygıtlar

Bir malzemede gözlenen optik süreçleri ışık yayma (radyasyon) ve ışık soğurma şeklinde ikiye ayırabiliriz. Işığın yayılması ya da soğurulması, başat olarak ilgili malzemenin yasak enerji bandının yüksekliğine, bu bandın tipine ve de yapıdaki yük taşıyıcılarının özelliklerine bağlı olarak değişebilmektedir. Malzemenin ışığı soğurarak uyarılması yani gelen fotonun enerjisinden ötürü değerlik bandında bulunan bir elektronun iletim bandına geçmesiyle iletkenliğinin artması olgusu

‘fotoiletkenlik’ olarak bilinir. Bu tarzda çalışan aygıtlara genel olarak fotodiyot denir ve, güneş pillerinin ve fotodetektörlerinin (PD) temelini oluşturur. Bu durumun tersi yani herhangi bir dış alan (ısı, elektrik, manyetik alan vb.) etkisiyle ışık yayılma olayıdır. Bu süreç ise ışık yayan diyotların (LED) ve yarıiletken lazer-diyotların (LD) temelini oluşturur.

Güneş pilleri: Optik radyasyonu elektrik enerjisine dönüştürürler. Dünya genelinde artmakta olan enerji talebi, fosil yakıt kaynaklarının tükenmesini hızlandırdığı gibi çevreye de geri dönülmez hasarlar vermektedir. Güneş enerjisini elde edebilen güneş pilleri bu tabloyu yavaşlatabilecek ve hatta durdurabilecek önemli bir adaydır.

Fotodetektör aygıtlar: Alınan optik gücü kuvvetlendirerek kullanışlı bir forumda elektrik sinyaline dönüştürürler. Bu aygıtların performansı temel olarak iki parametreye bağlıdır. Birincisi kuantum verimliliği adını verebileceğimiz bir kavramdır ki gelen foton başına toplanan elektron-deşik çifti sayısıdır. İkincisi ise kullanılan malzemenin soğurma katsayısı ve bant aralığıdır.

Yarıiletken ışık-yayan diyotlar (LED) ve lazer diyotlar (LD): Bu aygıtlar elektrik enerjisini optik radyasyona çevirir. Genel olarak LED’ler aydınlatma, görüntüleme sistemleri; LD’ler ise başta tıbbi, askeri, telekomünikasyon sistemleri olmak üzere geniş bir yelpazede kullanım imkânı bulmaktadır.

Optoelektronik aygıtlar, günümüz teknolojisinin birçok alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde bilgiyi koruma, taşıma, kullanabilme gibi konularda optiksel sinyallerin çok önemli bir yeri vardır. Bunun yanı sıra, optiksel okumaya dayalı hafıza sistemlerinde, telekomünikasyon ve görüntüleme (display) uygulamalarında gerek eşfazlı (*coherent*) gerekse eşfazsız (*incoherent*) ışık yayan aygıtlardan elde edilen optiksel demetler kullanılması artık bu yüzyılda sıradan bir iş olmuştur.

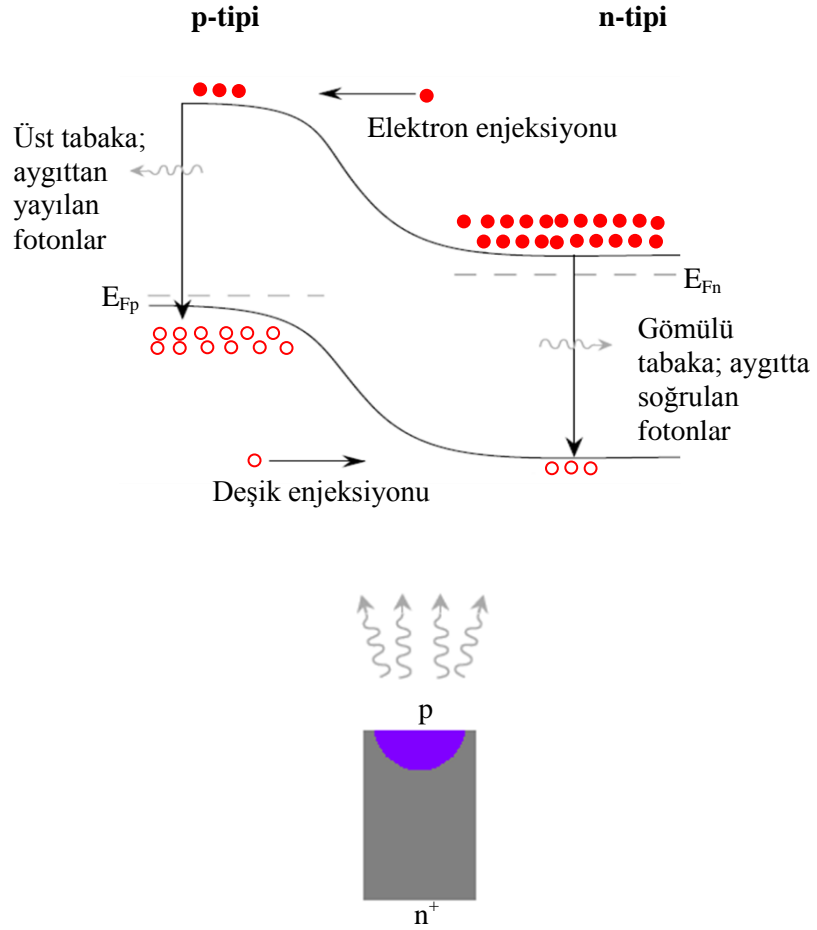
Kuşkusuz, reklam panolarındaki gaz deşarjına dayalı aygıtlar, ısınan filamanla aydınlatma yapan aygıtlar ve de televizyon ve bilgisayar ekranlarındaki fosforesans tabanlı görüntüleme aygıtları teknolojimizde hatırı sayılır bir yere sahiptir. Bununla birlikte bu aygıtların hem enerji sarfiyatı hem de yer kaplama bakımından minyatürleşmesi günümüz teknolojisinin en büyük uğraşlarından biri olmaktadır. Bu bakımdan, yarıiletken tabanlı aygıtlar, birçok açıdan minyatürleşmeyi sağladığı için günümüz teknolojisinde ümitkâr bir konumdadır. Bu bağlamda, acaba her gün gelişen epitaksiyel kristal büyütme ve yeni malzeme arayışlarını zaten yaygın bir şekilde kullanılmaya başlayan optoelektronik aygıtlara ne gibi ek özellikler kazandıracaktır kısaca inceleyelim.

5.2.1. Işık Yayan Diyotlar (LEDs)

LED'ler optoelektronik teknolojisinde yaygın olarak kullanılan önemli ışık kaynaklarından birisidir. Basit bir LED aslında, Şekil 5.5'te gösterildiği gibi, bir p-n ekleminden ibaret olduğundan p-n eklemine ait özellikleri de ihtiva etmektedir. LED'lerin yapımında kullanılan yarıiletken ve katkı maddesi, LED'den yayılan ışının spektrumunu belirler. Başka bir deyişle yayılan ışığın rengi; LED'i kaplayan kılıftan değil, LED'in yapımında kullanılan yarıiletken malzemenin yasak bant aralığından kaynaklanmaktadır (aslında bu şekilde çalışan LED ler de vardır. Özellikle son zamanlarda önemli bir araştırma alanı haline gelen Organik LED'ler (OLEDs) buna iyi bir örnektir).

Görüntüleme aygıtlarında ve küçük ölçekli optiksel haberleşmede kullanılan LED'ler en temel optoelektronik aygıtlardan biridir. Ancak, yüksek modülasyon hızı ve spektral olarak daha bariz bir optiksel çıkış (*output*) gerektiren aygıtlar söz konusu olduğunda yerini lazer diyotlara (LD) bırakmaktadır. Bir LED'in optiksel çıkışının spektral genişliği $k_B T$ düzeyindedir. Bu, oda sıcaklığında aygıttan çıkan ışınların spektral genişliğinin ortalama 300-400°A dolayında olması anlamına gelir. Bu değer

LD'lere kıyasla gayet geniş olmakla birlikte insan gözü için tek renk olarak algılanmaktadır. İşte bu nedenle LED'ler görüntüleme sistemlerinin en temel bileşenleridir.



Şekil 5.5 Düz beslem altındaki bir p-n eklemi. Eklem n-bölgesi cihaza gömülme suretiyle buraya enjekte edilen deşiklerin oluşturacağı fotonlar LED'in yüzeyinden çıkmazlar. Cihazın üst kısmında yer alan p-bölgesine enjekte edilen elektronlar yüzeye daha yakın yerde foton üreteceği için yüzeyden salınma imkânı çok daha fazladır. Enjekte edilen elektronlar ve deşikler quasi Fermi dağılım fonksiyonuyla tasvir edildiğinden aygıttan yayılan ışın, yarıiletken malzemenin bant aralığına çok yakındır. Öyleyse, arzulanan ışığı elde etmek için farklı bant aralığına sahip malzemeler kullanılabilir.

Temel olarak, basit bir LED'i düz beslenen p-n eklemi olarak tanımlayabiliriz. Düz beslemde, elektronlar n tarafından p tarafına akarken deşikler de p tarafından n tarafına akarlar. Bu esnada, enjekte edilen azınlık taşıyıcıları ile, nötr bölgede veya tüketim tabakasında çoğunluk taşıyıcılarının yeniden-birleşme (*recombination*) süreci gerçekleşir. Yeniden-birleşme sürecinde, iletim bandında bulunan bir elektron değerlik bandındaki bir boş duruma düştüğünde, enerji korunum ilkesi gereği bir foton yayınlar. Direkt bant tipine sahip yarıiletkenlerde böyle bu tarz yeniden-birleşme ışık yayma ile sonuçlanırken indirektlerde bu verim çok daha düşüktür. Genellikle, indirekt malzemeler ışıktan ziyade ısı ürettikleri için LED'ler direkt bant aralıklı yarıiletkenlerden yapılır. Yeniden-birleşmeden önce, taşıyıcılar sıcaklık dengesine geldikleri için baskın olarak yayılan foton enerjisi, ilgili malzemenin enerji aralığı (E_g) civarındadır. Öyleyse, farklı bant aralıklarına sahip yarıiletkenlerle farklı renklerde ışık üretmek mümkündür. Genellikle basit bir LED'in kırılma indisi büyük olduğundan yayınlanan fotonların büyük bir kısmı yüzeyde, içe yansıdığı ve tekrar soğrulduğu için LED verimi oldukça düşüktür (Hook ve Hall, 1999).

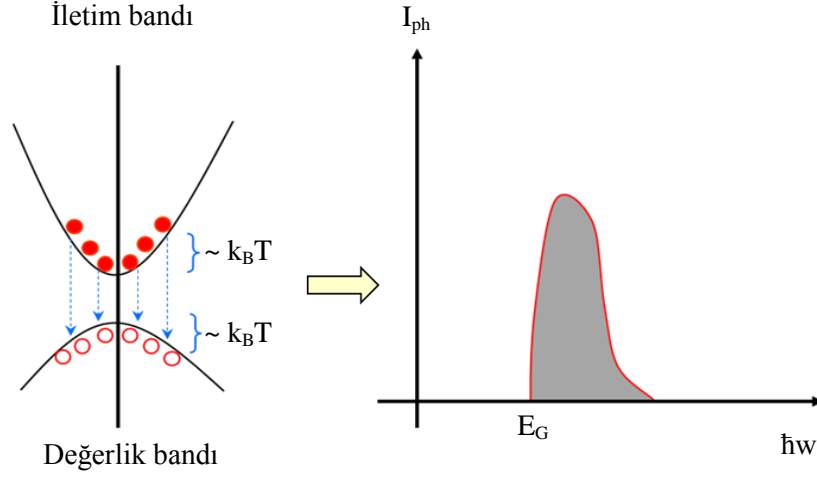
Şekil 5.5'te gösterildiği gibi, bir LED öyle tasarlanmalıdır ki yapının gömülü tarafında olabilecek herhangi bir foton yayılmasının önüne geçilerek fotonların sadece üst katmanda yayılması sağlanmalıdır. Ayrıca, böyle bir tarzla aygıtın dip kısmında salınan fotonların tekrar soğrulma ihtimaliyeti artırılmış olunur. Yine, tasarımın sonucu olarak, sadece tek bir taşıyıcı türünün enjeksiyonu yeterlidir. Nitekim genellikle bir LED'in üst tabakası p tipi yapılarak; bu tabakada foton salınması için gerekli diyot akımı, elektron akımı tarafından kontrol edilir. Öyleyse, azınlık yükler (yani ilgili tasarımdaki elektronlar) katkılanmış nötr tarafa (p-tipi) enjekte edildiğinde, elektronlar ve deşikler yeniden-birleşerek foton üretirler. Yeniden-birleşmede, kusurlar ve fononlar söz konusu ise ışık çıkmayacaktır. Bu yüzden ışıklı yeniden-birleşme süreci için gayet kaliteli ve direkt bant aralığına sahip yarıiletkenler tercih edilir (Singh, 1994).

5.2.1.1. LED'lerin spektral saflığı

Yayılan ışmanın spektral saflığı veya çizgi genişliği (*linewidth*) optik aygıtlar için önemli bir kıstastır. Aslında bu durum, kullanım alanına göre belirleyicidir. Sözelimi, görüntüleme aygıtlarında LED'ler rahatlıkla kullanılır. Zira LED'lerin yaydığı ışık insan gözünde baskın olarak tek bir renge karşılık geldiği için görüntüleme sistemlerinde LED'lerin kullanımında herhangi bir sıkıntı yoktur. Fakat spektral keskinliğin çok önemli olduğu optiksel haberleşme sistemlerinde, maalesef aynı durum söz konusu değildir. Çünkü, fiber optik bir kabloda taşınan, farklı dalga boylarının ışık pulsları farklı hızlarda iletilir. Tıpkı LED'lerdeki gibi geniş bir dalgaboyu kanat açıklığına sahip bir optik demetin böyle bir fiber içerisinde taşınması sinyallerin bozulmasına neden olacağı için pek tercih edilmez (sinyal demetini oluşturan ışıklar farklı fazlardadır). Artık bu aşamada lazerler söz sahibidir. Düşük enjeksiyonda bu genişlik $k_B T$ düzeyinde iken enjeksiyon yüksek olduğunda aşağıdaki gibi nitelenir.

$$\Delta E \sim \frac{n}{N_c} k_B T \quad (5.1)$$

Burada n toplam yük yoğunluğu, N_c etkin bant-kenarı durum yoğunluğudur. Herhangi bir LED için tipik emisyon spektrumu Şekil 5.6'da verilmektedir. Oda sıcaklığında, çizgi genişliği (*linewidth*) yani yarı maksimumdaki tam genişlik $200 \text{ }^\circ\text{A}$ seviyesindedir. Bu durum, geniş bir spektruma denk düşmekle birlikte görüntüleme sistemleri gibi bazı uygulamalar için yeterlidir. Aslında, kısa-erimli sistemlerde, optik sinyalde herhangi bir bozulma olmadığı sürece, optik haberleşmelerde LED'ler kullanılırken uzun-erimli sistemlerde LED çıkış verimi yetersiz olduğundan lazer diyotların kullanılması kaçınılmazdır.



Şekil 5.6 Bir LED'de, elektronlar ve deşikler $k_B T$ 'lik enerji genişliğini kaplayacak şekilde dağılırlar (Oda sıcaklığında $k_B T \sim 25$ meV). Bu skaladaki tüm elektron-deşik çiftleri optik çıkışa katkı sağladığı için doğal olarak LED çıkışı kabaca $k_B T$ 'lik bir genişlikte olacaktır. Bu genişlik insan gözünün fark edemeyeceği bir değerde olduğu için görüntüleme sistemlerinde LED'lerin kullanılmasını sağlamıştır. Fakat yüksek modülasyonlu cihazlarda bu genişlik problem oluşturacağından bu tür cihazlarda LED'lerin kullanımı pek tercih edilmez. Burada I_{ph} saniye başına üretilen foton sayısıdır.

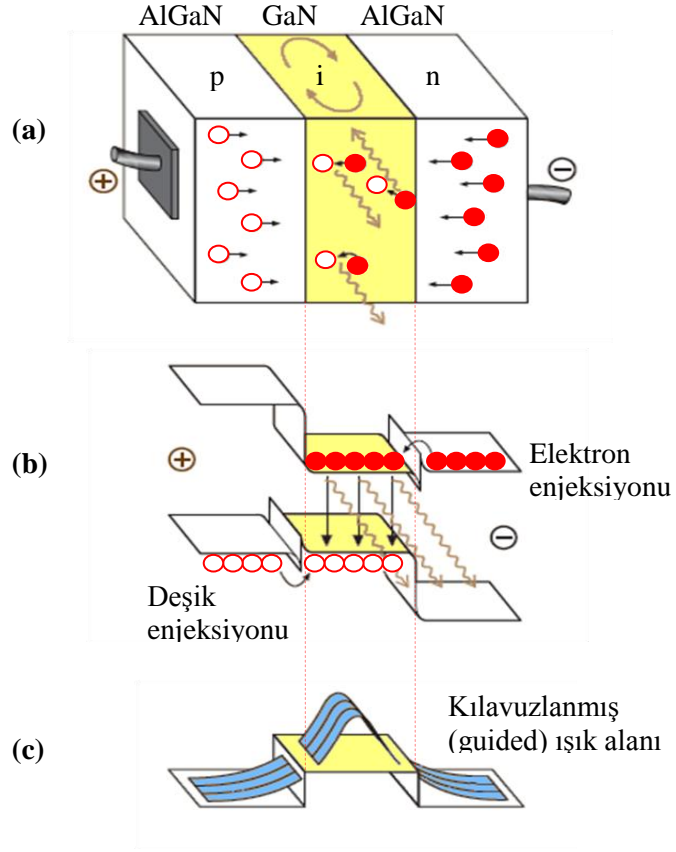
5.2.1.2. Gelişmiş LED Tasarımları

Yayılan ışığın (emisyon) şiddetini, diğer bir deyişle koherentliğini artırabilmek ve de çıkan ışığın fiber kabloya girişini daha verimli kılabilmek için bazı tasarımlar yapıla gelmektedir.

(a) Heteroeklem LED

Tek bir tür yarıiletken den yapılan (homoeklem) LED'lerde bir takım eksiklikler vardır. Bilindiği gibi bir homoeklemde, salınan fotonları tekrar soğurmamak için aygıtın foton salın kısmı yüzeye çok yakın olmak durumundaydı. Ancak bir yarıiletkenin yüzey kalitesinin genellikle çokta iyi olmadığı unutulmamalıdır. İşte bu yüzden ışıklı yeniden-birleşme süreci bir hayli sıkıntılıdır. Buna ek olarak, enjekte edilen elektronların deşikler ile yeniden-birleşmeden önce n bölgesinden p bölgesine

uzun bir mesafe boyunca difüzyon etmeleri gerekir. Böyle bir durumda, fotonların ortaya çıktığı efektif hacim oldukça geniş olmaktadır ve oluşan fotonların yeniden soğurulma olasılığı artmaktadır (Singh, 1995).



Şekil 5.7 (a) Tipik bir heteroeklem LED şeması, (b) düz beslem altında şeması, (c) kırılma indisi. Nispeten daha geniş bant aralıklı bir malzeme (burada AlGaN), daha dar aralıklı bir malzemeyi (burada GaN) çevreler. Burada, geniş aralıklı n ve p bölgelerindeki elektronlar ve deşikler kontrollü bir şekilde dar aralıklı aktif bölgeye enjekte edilir. Dikkat edilirse, bu elektronlar aktif bölgenin ötesindeki geniş aralıklı p bölgesine geçmesi oldukça zor olduğu için daha önce değindiğimiz kötü yüzey şartlarından etkilenmeyecektir.

Bu tür ve benzer problemlerin üstesinden gelerek aygıt verimini artırabilmek için heteroeklem LED'ler geliştirilmiştir. Heteroeklem LED'ler, daha geniş bant aralıklı bir malzemeden dar aralıklı bir aktif bölgeye (ışımının gerçekleştiği optikçe

etkin bölge) kontrollü bir şekilde yükleri enjekte ederek bu problemleri çözebilmektedir. Şekil 5.7’de böyle bir yapının şeması bulunmaktadır. Burada, geniş aralıklı n ve p bölgelerindeki elektronlar ve deşikler dar aralıklı aktif bölgeye enjekte edilmektedir. Dikkat edilirse, bu elektronlar aktif bölgenin ötesindeki geniş aralıklı p bölgesine giremeyeceği için daha önce değindiğimiz kötü yüzey şartlarından etkilenmeyecektir.

Unutulmamalıdır ki salınan fotonlar alt veya üst bölgede soğrulmadığı için foton enerjisi n bölgesinin veya p bölgesinin (yani dış tabakaların, örnekte AlGaN) bant aralığından daha düşük olup aktif bölgenin bant aralığıyla orantılıdır. Bu tür heteroeklem LED’ler gelişmiş epitaksiyel büyütme teknikleriyle rahatlıkla yapılabilmektedir. Aktif tabakanın kalınlığı diğer tabakalara nazaran çok daha incedir. MOCVD, MBE gibi ileri epitaksiyel tekniklerle bu tür heteroyapılar rahatlıkla yapılabilmektedir.

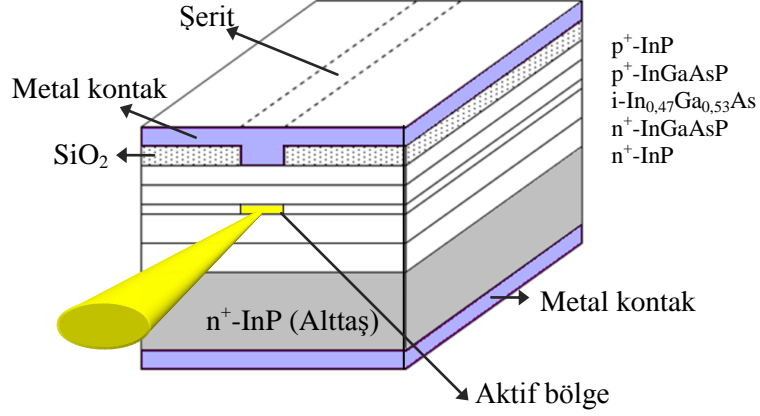
(b) Kenar Yayılmalı (*Edge Emitting*) LED

Optiksel haberleşmedeki bir diğer önemli konu da LED’den yayılan ışığın fibere birleştirilmesidir. Kuplaj verimi olarak adlandırabileceğimiz bu durumu artırabilmek için aygıttan salınan demetlerin mümkün olduğu kadar paralelleştirilmiş (*collimated*) olması gerekmektedir. Bu bağlamda, daha iyi verim elde edebilmek için kenar yayılmalı ve yüzey yayılmalı LED yapıları geliştirilmiştir.

Şekil 5.8’de heteroyapı teknolojisiyle üretilen tipik bir kenar yayılmalı LED gösterilmektedir. Hatırlatmakta fayda vardır; bu yapı neredeyse bir lazer diyot gibi gözükmektedir. Ancak burada lazer diyotlar için istisnai bir durum olan, optiksel geribeslemeyi (*feedback*) temin etmek için yüksek kaliteli bir optiksel oyuk (*cavity*) bulunmamaktadır.

Kenar yayılmalı LED’lerde, geniş aralıklı kılıf katman tabakaları (*cladding layer*) kullanılarak birçok avantajlar sağlanmaktadır. Bu katmanlarla hem elektronlar

ve deşikler aktif tabakaya hapsedilir hem de salınan fotonların LED eksenini boyunca yol almaları ve aygıtın kenarından çıkmaları sağlanır.

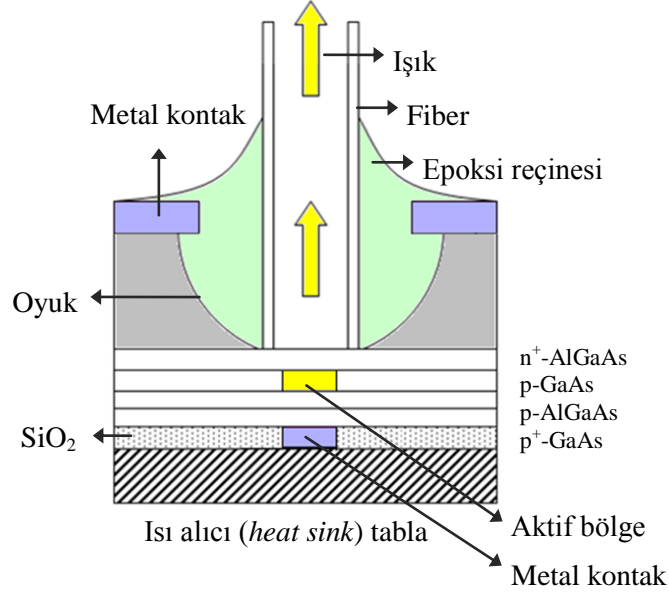


Şekil 5.8 Kenardan yayımlı LED'in şeması. Bu yapıdaki, aktif bölge i-In_{0,47}Ga_{0,53}As (0,8 eV), kılıf katmanlar (cladding layer) ise sırayla p⁺-InGaAsP ve n⁺-InGaAsP (~1 eV) tabakalarıdır. Bu tabakalarla ışığın sadece aygıtın kenarlardan yayılması sağlanır. En uç p⁺-InP ve n⁺-InP (1,35 eV) katmanları ise ışığın daha iyi sınırlandırılmasını sağlamaktadır. Dikkat edilirse, aktif bölge diğerlerine nazaran oldukça incedir. Metal şerit (mavi renk) dar yapılarak, aktif bölgeden yayılan ışığın sadece küçük bir alandan çıkması sağlanır (sarı renkli alan). SiO₂ (noktalı bölge) işte bu şeridin dar olması için kullanılır.

(c) YüzeY Yayılmalı (Surface Emitting) LED

Önemli bir LED türü olan bu tasarım ilk kez Burrus ve Dawson tarafından gerçekleştirilmiştir (1970). Şekil 5.9'de böyle bir LED şeması bulunmaktadır. Aslında bu yüzeY yayılmalı LED'lerin temelinde de; dar bant aralıklı bir aktif tabakanın geniş bant aralıklı bölgelerle çevrilen bir heteroyapı LED uslamlaması yatmaktadır. Bu yapıdaki en bariz fark, aygıttan çıkan ışınların fiberle çiftlemeni iyileştirmektir. Şekilde gösterildiği üzere LED'in üst kısmı asitle aşındırarak (*etching*) bir boşluk oluşturmuştur. Bu boşluk üzerine eklenen epoksi reçinesi (*epoxy resin*) ile aygıt bir fibere iliştilir. Bu yapıda, salınan fotonlar doğrudan fibere yönlendirilir.

Ayrıca bazı gelişmiş yapılarda, LED üzerine mikrolensler yerleştirilerek kuplaj verimi iyileştirilir.



Şekil 5.9 Yüzeysel yayımlı bir LED'in şeması. Epoksi reçinesi ile fiber, LED'e monte edilir. Bu yapıda, aktif tabakada üretilen ışık doğrudan fibere yönlendirilir. Bu türün gelişmiş versiyonlarında mikrolensler kullanılarak kuplaj verimi iyileştirilir. Burada SiO₂ (noktalı alan) yalıtıcı görevinde olup metal kontakın küçük bir kesimi yapıya temas ettirilir. Isı alıcı (çizgili alan) olarak genellikle altın veya bakır bir plaka kullanılır. Isı alıcı, hem fazlasıyla ısınan sistemi soğutmak için hem de alt taraftan çıkan fotonları engellemek için kullanılır.

LED'ler önemli bir optiksel kaynak olduğu için birçok uygulamada kullanım imkânı bulmaktadır. LED'lerin en büyük avantajı; fabrikasyonu basit olması ve çoğu devre elemanı ile birlikte kullanılabilir olmasıdır. Bununla birlikte, yüksek performanslı aygıtlarda LED'ler pek tercih edilmemektedir. Nitekim salınan ışığın geniş spektrumlu olmasından ötürü modülasyon bant genişlikleri (*bandwidth*) birkaç GHz (gigahertz) üzeri olan aygıtlarda kullanışsız olmaktadır. Lazer diyotlar (LD) kullanılarak işte bu sıkıntıların üstesinden gelinebilir. Bir LED'e göre LD'lerin çizgi genişliği (*linewidth*) fazlasıyla dardır. LD'in modülasyon bant genişliği 50 GHz

civarında ve hatta prensipte bu değerden çok daha da yüksektir (Singh, 1994). Ayrıca uzamsal eşfazlılığı daha kaliteli olduğundan yarıiletken lazer demetleri diğer kaynakların demetleri kadar dağılmazlar. Dolayısıyla çok yüksek bir şiddette çıkış verdiği için LD'ler büyük önem taşımaktadır.

5.2.2. Lazer Diyotlar (LDs)

Lazer kelimesi radyasyonun uyarılmış yayma yoluyla ışığın yükseltilmesi (şiddetlendirilmesi) anlamına gelen İngilizce kelimelerin baş harflerinden türetilmiştir (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Buradaki yükseltme zincirleme olaylar sonucu sistemden yayınlanacak foton sayısının artırılması anlamını taşımaktadır. Tarihsel olarak düşünürsek, Albert Einstein 1917’de uyarılmış yayma sürecinin var olduğunu göstermiştir (Wilson ve Hawkes, 2000). Bu öngörü 1960’da, Theodore Maiman tarafından pratiğe dönüştürülmüştür. Bu ilk çalışan lazer, çevresi spiral bir camla çevrilmiş yapay bir yakut silindirden oluşuyordu (Maiman, 1960).

İlk lazerin geliştirilmesinden bu yana bu alanda çok önemli gelişmeler devam etmektedir. Şuan kızıl ötesi, görünür ve mor ötesi bölgelerindeki dalga boylarında lazer ışığı elde edilebilmektedir. Lazer ışığı tek-renkli ve eşfazlı (koherent) olma özelliklerinin gayet iyi olmasının yanı sıra aynı zamanda son derece iyi yönlendirilebilme ve de son derece şiddetli demet oluşturacak şekilde odaklanabilme özelliklerine sahip olmalıdır. Lazerlerin bu ve benzer özelliklerinden ötürü; başlıca retinaların cerrahi müdahalesi, ayrıntılı olarak yüzey ve uzunluk ölçümü, nükleer füzyon reaksiyonlarını tetiklemek için potansiyel bir kaynak oluşturulması, çeşitli maddelerin hassas bir şekilde kesimi, fiber optik kablolar vasıtasıyla haberleşme sistemleri, optiksel hafıza sistemleri, yeni nesil görüntüleme sistemleri (holografi, 3d, vb) savunma sanayisi gibi birçok uygulama sahasında kullanım imkânı bulunmaktadır.

Olağan bir ışık kaynağı, hem değişik dalgaboylarını hem de farklı fazlı dalgaları bulundurur. Ancak lazer ışığı bu durumdan çok daha farklıdır. Nitekim lazer ışığında tek bir dalgaboyu baskındır ve aynı dalgaboyundaki dalgalar eşfazlıdır (koherent). Başka bir deyişle, demetteki fotonları temsil eden dalgaların tümü aynı fazdadır. Bir lazer yapısında yükseltici ortam enerji aldıkça atomlar yalnızca belirli frekanslarda ışık salmaya başlarlar. Böyle bir atomdan çıkan ışık komşu atoma

çarparak onunda aynı frekanslarda ışıma yapması sağlar. Bu tarz, oluşan zincir etkisi sürerek pek çok atomun aynı anda ve aynı frekansta ışıma yapması mümkünleştirir. Ayrıca çıkan ışık özel aynalar yardımı ile yapı içerisinde tutularak biriktirilir. Işık genliği yeteri kadar büyüdüğünde, bu ışık, aynaların yarı yansıtıcı olanından geçerek kontrollü bir şekilde aygıttan lazer ışını elde edilmiş olur

5.2.2.1. Lasing için temel prensipler

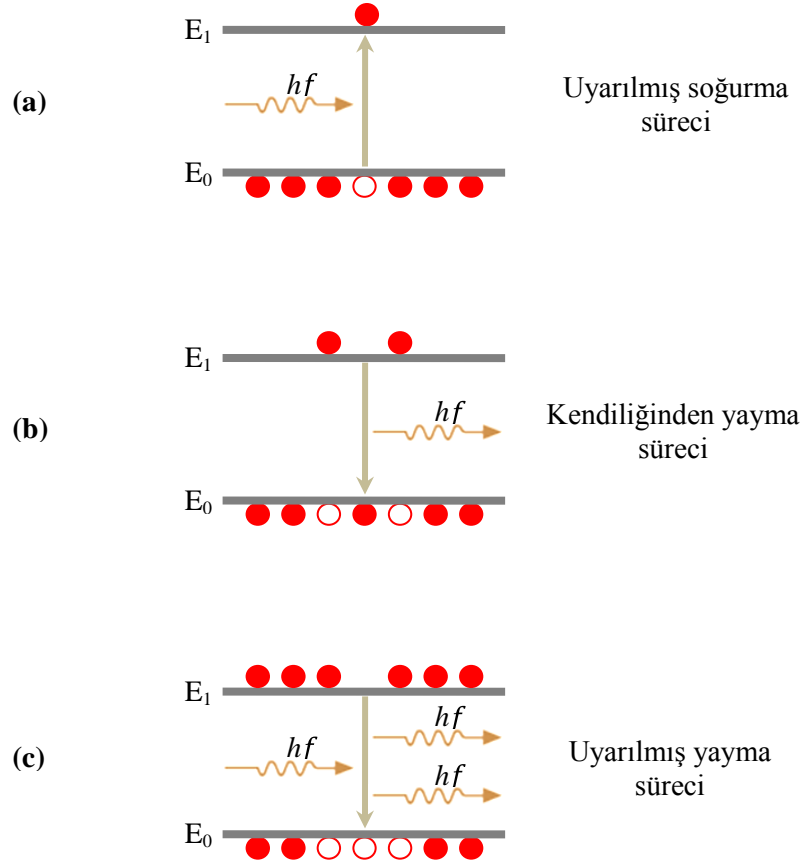
Lazerin işleyişine geçmeden önce atomik geçiş mekanizmalarınının hatırlatmakta fayda vardır. Bir atom yalnızca izinli durumlar arasındaki enerji farklarına denk gelen belirli frekanslarda ışıma yapabilir. Atom üzerine ışık düşürüldüğünde enerjisi, atomun iki enerji düzeyine arasındaki farka karşılık gelen hf enerjili fotonlar soğuralabilir. Böyle bir “uyarılmış soğurma süreci”nin temsili Şekil 5.10’da gösterilmektedir. Yine aynı şekilde, bir atom uyarılmış durumda ise belirli bir olasılıkla bir foton yayarak daha düşük bir enerji düzeyine düşmesi gösterilmektedir. Bu olay “kendiliğinden yayma” olarak adlandırılır. Normalde bir atomun uyarılmış durumda kalabilme süresi sadece nanosaniye mertebesindedir.

Bunlara ilaveten lazerler için oldukça önemli olan “uyarılmış yayma” olarak bilinen üçüncü bir süreç vardır. Şekil 5.10’da gösterildiği gibi E_1 uyarılmış düzeyinde iken, aşağıda frekansı verilen E_1-E_0 enerjili bir foton bu atom üzerine düşürülsün.

$$f = \frac{(E_2 - E_1)}{h} \quad (5.2)$$

Bu durumda, gelen foton ile üst seviyedeki elektronun taban duruma geri dönmesini ve böylece aynı enerjisine sahip bir foton salınma olasılığı artacaktır. Daha düşük enerji düzeylerine geçişin bu yolla hızlandırılması olayına “uyarılmış yayma” denir. Dikkat edilirse, bu süreç sonrasında gelen ve salınan olmak üzere birbirine özdeş iki foton görülmektedir. Salınan foton gelen foton ile tamamen aynı fazdadır. Bu fotonlar benzer olaylar zinciriyle diğer atomlarla etkileşerek foton yayılmasına sebep

olabilirler ki bu tarzla üretilmiş çok sayıdaki foton bir lazerdeki şiddetli ve eşfazlı ışığın kaynağıdır (Serway, 1996).



Şekil 5.10 Bir elektromanyetik dalga ile etkileşen atomdaki temel etkileşim süreçleri. Atom üzerine ışık düşürüldüğünde, atom uygun hf enerjili foton bir foton soğurarak uyarılır. Böyle bir durum “uyarılmış soğurma süreci” olarak bilinir (a). Uyarılmış durumdaki bir atom foton salarak karar olmak, yani taban duruma düşmek ister. Foton yaymak için elektron ve deşik yeniden-birleşir ki bu süreç kendiliğinden yaymadır (b). LED'lerin işleminde bu süreç geçerlidir. (c) şıkında kendiliğinden yayma sürecine ek olarak uyarılmış yayma vardır. Burada yayılan fotonlar gelen foton ile aynı fazdadır. Yani yayılan fotonlar gelen fotonla aynı enerji ve dalga vektörüne sahiptir. LD'lerin işleminde ise bu süreç geçerlidir.

Atom üzerine bir foton düşmesiyle uyarılmış soğurma ya da uyarılmış yayınlama süreçleriyle atomik geçişlerin olabileceği ve bunların eşit olasılıkla olabileceği bilinmektedir. Termodinamik yasalarına göre termal dengedeki bir sistemde taban durumunda bulunan atomların sayısı uyarılmış durumda bulunanlardan çok daha fazladır. Yani normal olarak foton soğurabilecek E_0 enerji düzeyindeki atom sayısı, foton yayınlayabilecek E_1 ve üzeri enerji düzeylerindeki atom sayısından çok daha fazladır. Bu durum aslında, Şekil 4.20’de gösterildiği gibi Boltzmann Dağılımının bir sonucudur. Durum böyle olmakla birlikte, sistemin uyarılmış bir durumdaki atom sayısı taban durumundakinden daha fazla olacak şekilde tersine çevrilebilirse, net olarak foton salınması gerçekleşebilir. Böyle bir durumun oluşturulmasına “nüfus terslenmesi” denir. Aslında bu mekanizma bir lazerin işletilmesindeki temel prensiptir. Yüksek enerjili atomların sayısını artırabilmek için başka bir deyişle nüfus terslenmesini gerçekleştirebilmek için yapıya dışarıdan enerji vermek gerekir ki buna da “pompalama” (*pumping*) denir. Kısaca özetlersek, lazerlemenin gerçekleşebilmesi için özellikle aşağıdaki üç şartın sağlanması gerekmektedir.

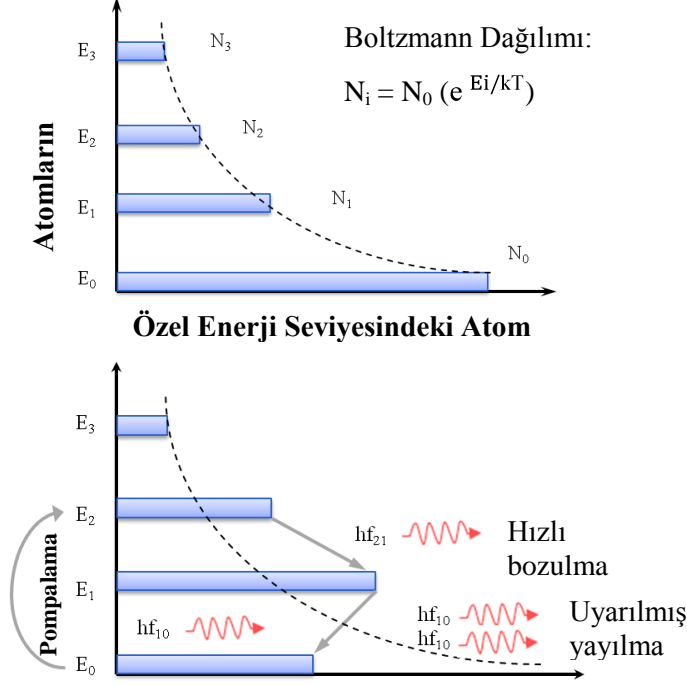
- ✓ Sistemde nüfus terslenmesi gerçekleşmelidir. Yani taban duruma kıyasla uyarılmış bir durumda çok daha fazla atom olmalıdır.
- ✓ Uyarılmış durum, bir yarı kararlı (*metastable*) durum olmalıdır. Böyle bir durumun ömrü, genellikle kısa olan uyarılmış durum ömürleriyle kıyaslandığında daha uzundur. Diğer bir deyişle E_1 , E_2 , $E_3...$ üst uyarılmış durumlarına geçen atomlar özellikle bir seviyede, diğer seviyelere göre çok daha uzun kalabilmelidir. Böyle bir durumda uyarılmış ışımaya kendiliğinden ışımaya göre daha baskındır.
- ✓ Yayılan fotonlar yeterince uzun bir süre sistem içerisinde tutulmalıdır ki diğer uyarılmış atomlar da uyarılmış ışımaya yapabilsinler. Sistemin uçlarına yansıtıcı aynalar yerleştirmek suretiyle bu durum gerçekleştirilir. Bu aynaları tasarlarken, birisi tamamen yansıtıcı diğeri ise uygun

büyükölge ulaşan lazer demetinin çıkışına izin verecek şekilde ilk aynaya nispeten biraz daha az yansıtıcı yani geçirgen olmalıdır.

Bu maddelerden ilk iki şartı sağlayarak lazer ışığı üretilir. Fakat lazerlerin çağımızın popüler bir araştırma konusu olmasını sağlayan ve oldukça kullanışlı yapan doğrultulmuş, tek-renkli ışık demetleri üretmek açısından bu iki şarta ilaveten üçüncü şartta oldukça öneme haizdir. Üçüncü şartla, yapı içerisinde geribesleme oluşturularak sadece belirli lazer titreşimleri için bir rezonans ortam hedeflenmektedir.

İlk lazerin yapıldığı 1960'dan beri birçok lazer türü (katı-hal, CO₂ lazer, iyon lazerler, HeNe lazer, ultraviyole lazerler, boya lazerler, serbest-elektron lazerler) geliştirilmekle birlikte bu çalışma kapsamında sadece yarıiletken lazerler üzerinde durulacaktır (diğer lazer türleri için bkz: (Kasap ve Capper, 2006)).

LED'ler önemli bir optiksel kaynak olduğu için birçok uygulamada kullanım imkânı bulmaktadır. LED'lerin en büyük avantajı; fabrikasyonu basit olması ve çoğu devre elemanı ile birlikte kullanılabilir olmasıdır. Bununla birlikte, yüksek performanslı aygıtlarda LED'ler pek tercih edilmemektedir. Nitekim salınan ışığın geniş spektrumlu olmasından ötürü modülasyon bant genişlikleri (*bandwidth*) birkaç GHz (gigahertz) üzeri olan aygıtlarda kullanışsız olmaktadır. Lazer diyotlar (LD) kullanılarak işte bu sıkıntılıların üstesinden gelinebilir. Bir LED'e göre LD'lerin çizgi genişliği (*linewidth*) fazlasıyla dardır. LD'in modülasyon bant genişliği 50 GHz civarında ve hatta prensipte bu değerden çok daha da yüksektir (Singh, 1994). Ayrıca uzamsal eşfzallığı daha kaliteli olduğundan yarıiletken lazer demetleri diğer kaynakların demetleri kadar dağılmazlar. Dolayısıyla çok yüksek bir şiddette çıkış verdiği için LD'ler büyük önem taşımaktadır.



Şekil 5.11 Atomların Boltzmann Dağılımı. Dikkat edilirse dengede iken oldukça çok miktardaki atom en düşük enerji seviyesindedir (üst şekil). Sistem pompalandığında, uyarılmış bir durumdaki atom sayısı taban durumundakinden daha fazla olacak şekilde tersine çevrilebilir ki bu eylem nüfus terslenmesi olarak bilinir.

Basit bir yarıiletken lazer diyot (LD) tıpkı LED gibi düz beslemedeki bir p-n eklemden ibarettir. Elektron ve deşikler açısından LED'lerle benzerlik gösterse de salınan fotonlar bakımından oldukça farklıdır. LED'lerde olduğu gibi, düz besleme yoluyla bir aktif bölgeye elektronlar ve deşikler enjekte edilir. Düşük enjeksiyonda bu elektronlar ve deşikler kendiliğinden yayma süreciyle yeniden-birleşerek foton yayarlar (LED'lerde bu durum geçerlidir). Bununla birlikte yüksek enjeksiyon sağlanarak bir lazerin yayma süreci uyarılmış yayma ile yönetilir. Uyarılmış yayma süreciyle eşfazlı fotonlar oluşturularak foton çıkışının spektral keskinliği artırılmış olunur ki bu durum yüksek performanslı aygıtlar için gerek koşuldur. Temel olarak, LED'ler ile LD'ler arasındaki en önemli fark kendiliğinden ve uyarılmış yayma

süreçlerinden kaynaklanmaktadır. Bu bağlamda, yarıiletken LD'leri anlamak için bu kavramların iyice anlaşılması şarttır.

Şimdi yarıiletkende kendiliğinden yayma yoluyla salınan fotonların, sadece belirli enerjili fotonları bulunduran bir optiksel oyuk (*optical cavity*) içinde hapsedildiğini kabul edelim. Bu durum gerçekleştirilirse aşağıdaki gibi iki önemli etki oluşur:

- ✓ Uyarılmış yayma nedeniyle seçilmiş enerjili fotonlar için emisyon daha güçlü olur
- ✓ Elektron-deşik yeniden-birleşme oranı artar

Bu iki faktör; çok dar emisyon çizgili bir optiksel spektrum üretebilme ve yüksek hızlarda ışık çıkışını modüle edilebilme imkânı sağladığı için son derece önemlidir.

Daha öncede değinildiği gibi, bir lazerin LED'e göre temel farkı, üretilen fotonlara kılavuzluk eden bir optiksel oyuk ihtiva etmesidir. Aslında bir optiksel oyuk, fotonların çoklu yansıma yapabildiği bir rezonant oyuğudur. Nitekim fotonlar salındığında sadece küçük bir kesri oyuğu terk edebilmektedir. Böylelikle oyuk içinde foton yoğunluğu artırılmaktadır. Yarıiletken lazerlerde kullanılan en önemli oyuk çeşitleri Fabry-Perot ve dikey oyuktur. Şekil 5.12'de gösterildiği gibi bir Fabry-Perot oyuğunun önemli bir parçası, parlatılmış yüzey aynalarıdır. Bu, oyuk içinde rezonant modların üretilmesini temin etmektedir. Aşağıdaki bağıntıyı sağlayan foton dalga boyları rezonant modlardır.

$$L = m \lambda / 2 \quad (5.3)$$

Burada m tam sayı, L oyuk genişliği ve λ malzeme içindeki ışığın dalga boyudur ve vakumdaki dalga boyuyla (λ_0) şu şekilde ilintilidir:

$$\lambda = \lambda_0/n_r \quad (5.4)$$

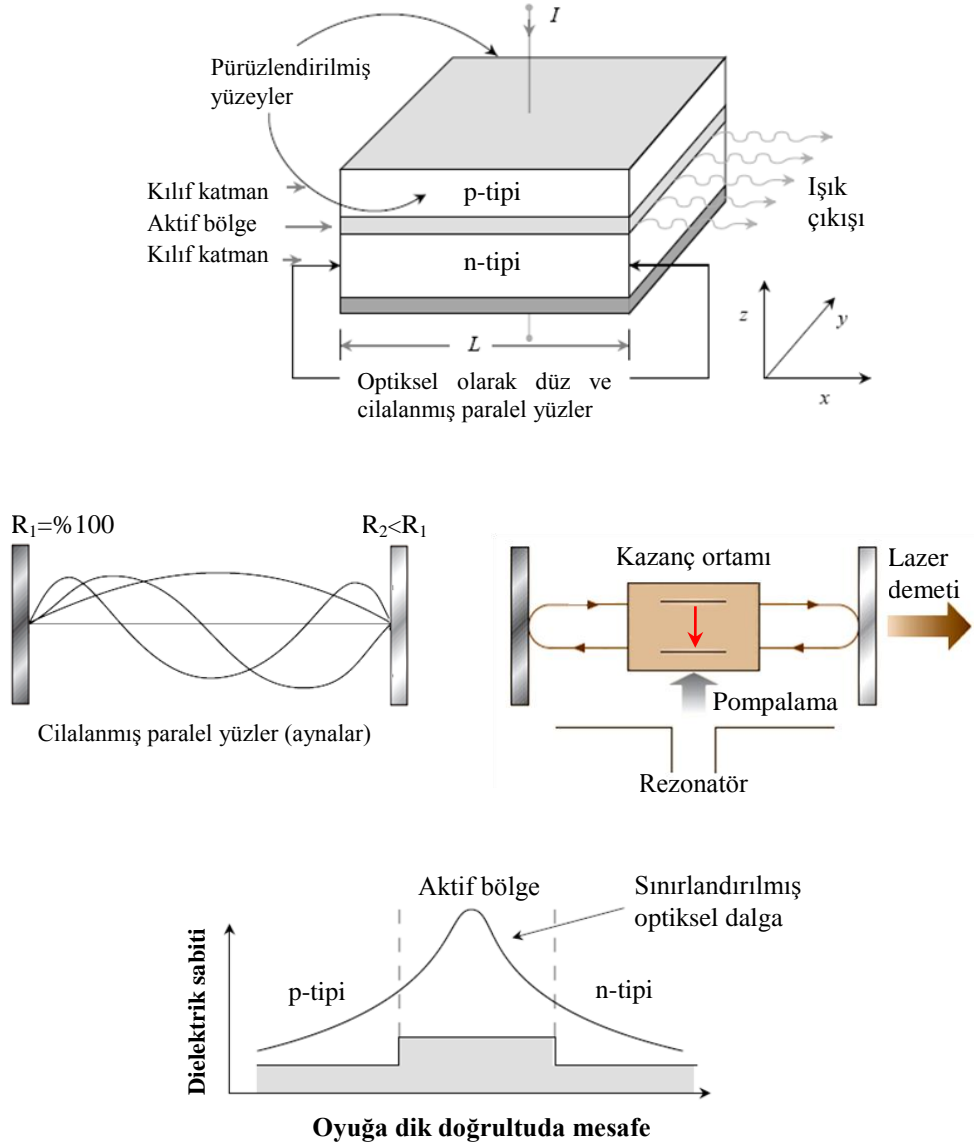
Burada n_r oyuğun kırılma indisidir. Şekil 5.12'de gösterildiği gibi Fabry-Perot oyuğunun iki yüzü ayna görevi sunarken diğer yüzler pürüzlendirilmiştir. Oyukta sadece rezonant modların gelişmesine izin verilir. Aynı şekilde (c şikkı) gösterilen bir düzlemsel heteroyapı z-ekseninde optiksel dalgayı hapsedmek için kullanılır. Optiksel eşitlik şu formdadır:

$$\frac{d^2 F_k(z)}{dz^2} + \left(\frac{\varepsilon(z) \omega^2}{c^2} - k^2 \right) F_k(z) = 0 \quad (5.5)$$

Burada F optiksel dalganın elektrik alanını temsil etmektedir. Dalganın z-yönünde hapsedilmesi için z-yönünde değişen bir dielektrik sabiti $\varepsilon(z)$ seçilir. Bu durum, doğal olarak geniş bant aralıklı kılıf katman (*cladding layer*) kullanılmasını gerektirir. Oyuğun önemli bir parametresi optiksel hapsedebilme faktörü Γ 'dir. Bu, aktif belgedeki optiksel dalga kesrini yani e-h yeniden-birleşmesini temsil etmektedir:

$$\Gamma = \frac{\int_{\text{Aktif bölge}} |F(z)|^2 dz}{\int |F(z)|^2 dz} \quad (5.6)$$

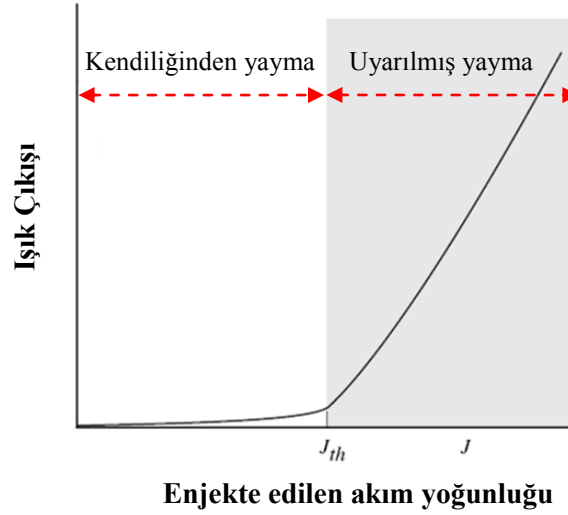
Oyuk içindeki izinli dalgaboylarına boyuna optiksel modlar denir. Şayet oyuğun ucundaki aynalar veya yüzeyler (*facet*) tümüyle paralel olmazsa enine optik modların olması da beklenemez. Bu durumda yüzey çıkışında (veya ayna) şiddet dağılmasına yol açacaktır. Dikkat edilirse bir yüz %100 yansıtıcı iken diğer yüz bu orandan daha düşük bir yansıtma katsayısına sahiptir ve böylece ışığın kontrollü bir şekilde oyuktan çıkması amaçlanır. İki ayna arasındaki bu bölgede izinli modlar (iyice tanımlanmış dalga boyları) şiddetlenerek uyarılmış emisyon gerçekleştirir.



Şekil 5.12 Fotonları hapsedmek için oyuk ve aynaların kullanıldığı tipik bir lazer yapısı (Singh, 2003)'den sonra. Ortada, oyuğun kararlı durumları gösterilmektedir. Üç tane boyuna optiksel mod gösterilmektedir. Bu rezonant durumlar aynalar vasıtasıyla gerçekleştirilir. Altta gösterildiği gibi optiksel hapsedme, dielektrik sabitindeki değişim ile sağlanır. Böyle bir yapı Fabry-Perot oyuğu olarak bilinir.

5.2.2.2. Lazerde Eşik Değer

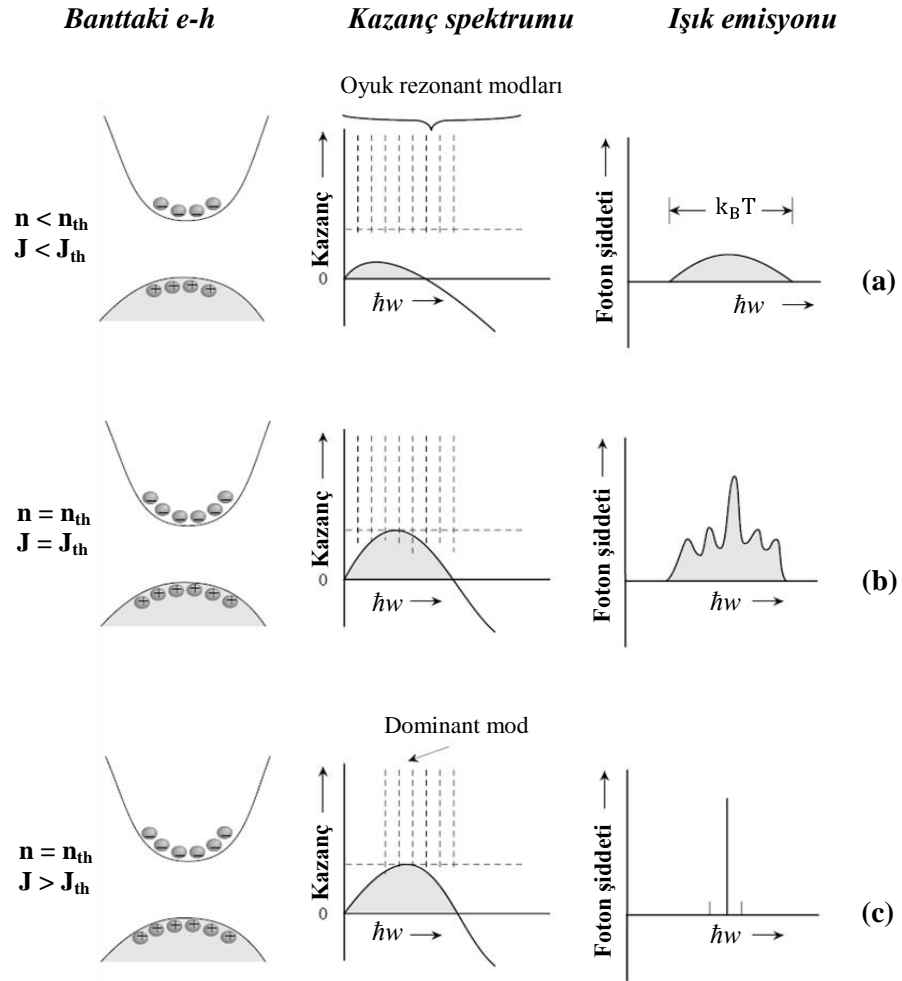
Şekil 5.13’de bir LD’de enjekte edilen akım yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak ışık çıkışı gösterilmektedir. Bu durum, LED’lerin ışık çıkışıyla karşılaştırıldığında önemli bir fark olduğu hissedilir. Lazerleme modlarındaki bir lazerden ışık çıkışı eşik şartının altındaki ve üstündeki değerlerde çok ani bir şekilde değişiklik göstermektedir. Eşik şartı; herhangi bir foton için oyuk kazancının oyuk kaybına üstün gelmesi şartı olarak tanımlanabilir.



Şekil 5.13 Bir yarıiletken lazerde enjeksiyon akımının fonksiyonu olarak lazerleme modlarındaki ışık çıkışı. Eşik değerini üzerine çıktığında, yüksek foton yoğunluğu uyarılmış yayma sürecinin baskın olmasına yol açtığından ışık çıkışı çok ani bir şekilde değişiklik göstermektedir. Burada J_{th} akım yoğunluğunu ifade etmektedir.

Lazer düz beslendiğinde elektronlar ve deşikler aktif bölgeye enjekte edilirler. Bu bölgede elektronlar ve deşikler yeniden-birleşerek foton salarlar. Şimdi Şekil 5.14’de gösterilen düz beslem akımına dikkat edelim. Şayet bu akım küçük ise doğal olarak enjekte edilen elektronlar ve deşikler de az miktarda olacaktır. Beklenildiği gibi aygıttaki kazanç, oyuk kaybına üstün gelemeyecek derede küçüktür. Bu durumda salınan fotonlar ya oyukta soğrulur ya da dışa sızarak yitirilir. Düz beslem artırıldığında aygıtta daha fazla taşıyıcı enjekte edilir ve bazı foton enerjileri için eşik

şartı sağlanmış olur. Sonuçta oyuk içindeki bu fotonların sayısı artmaya başlar. Uygulanan gerilim eşik değerin de ötesine geçtiğinde artık uyarılmış yayma oluşarak kendiliğinden yayma sürecine baskın gelir. Bu durumda bulunan foton modundaki ışık çıkışı çok daha güçlü olur.



Şekil 5.14 (a) Eşik değerinin altında lazer. Kazanç, oyuktaki kayıptan çok daha azdır ve ışık emisyonu tıpkı LED'lerdeki gibi oldukça geniştir. Başka bir deyişle, ışık çıkışında koherentlik yoktur. (b) Eşikte lazer. Bu durumda, oyuktaki foton sayısı artmaya başlar. Işık emisyonunda birkaç tane mod, artık baskın olmaya başlar. (c) Eşik değerinin üzerinde lazer. Bu değerde ise kazanç spektrumu değişmez, ama uyarılmış yaymadan dolayı baskın bir mod ön plana çıkar. Burada n_{th} eşik taşıyıcı yoğunluğu ve J_{th} eşik akım yoğunluğudur. Örneğin; 300 K'de aktif tabakasının kalınlığı 2 μm olan bir çift heteroyapı GaAs lazeri için $n_{th} = 1.32 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $J_{th} = 1.76 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ değerindedir (Singh, 2003).

5.2.3. Fotodetektörler (PDs)

5.2.3.1. Optik soğurulma

Uygun enerjili fotonlar bir yarıiletken üzerine düşürüldüğünde elektron ve deşik çiftleri üretecektir. Bu elektronlar ve deşikler, foton enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmede kullanılır. Optik dedektörler ve güneş pillerinin temelinde bu etkileşim yatmaktadır. Bir yarıiletkeni, optiksel olarak kullanabilmek için bu yarıiletkenin ışıınımdan etkilenmesi gerekmektedir. Başka bir deyişle farklı frekans aralığındaki ışıınımlar için farklı malzemeler gerektiği için dedektör yapımında kullanılacak malzemenin seçimi büyük önem taşımaktadır.

Bir yarıiletkene ışık düşmesiyle değerlik bandındaki bir elektronun iletim bandına çıkması “foton soğurulması” olarak bilinir. Yalnız, buradaki fotonun enerjisi belirleyicidir. Nitekim dolu değerlik bandındaki bir elektronu boş iletim bandına çıkartan bir fotonun enerjisi en az ilgili yarıiletkenin enerji aralığına denk olmalıdır. Aksi takdirde bir akım oluşamaz ve genellikle yarıiletkenin ısınmasıyla bu süreç son bulur.

Foton momentumu, elektron momentumuna kıyasla aşırı derece küçüktür. Momentumun korunumu k-uzayında e-h geçişlerinin dikey olmasını gerektirir. Foton soğurma süreci direkt bant tipli malzemelerde, indirekt bant tipli malzemelere göre çok daha güçlüdür. Çünkü sadece dikey geçişler izinli olduğundan indirekt aralıklı malzemeler foton soğurma süreci, ancak bir fonon (örgü titreşimi) katılımıyla gerçekleşir. Direkt bant aralıklı malzemeler için soğurma katsayısı (α) şöyledir:

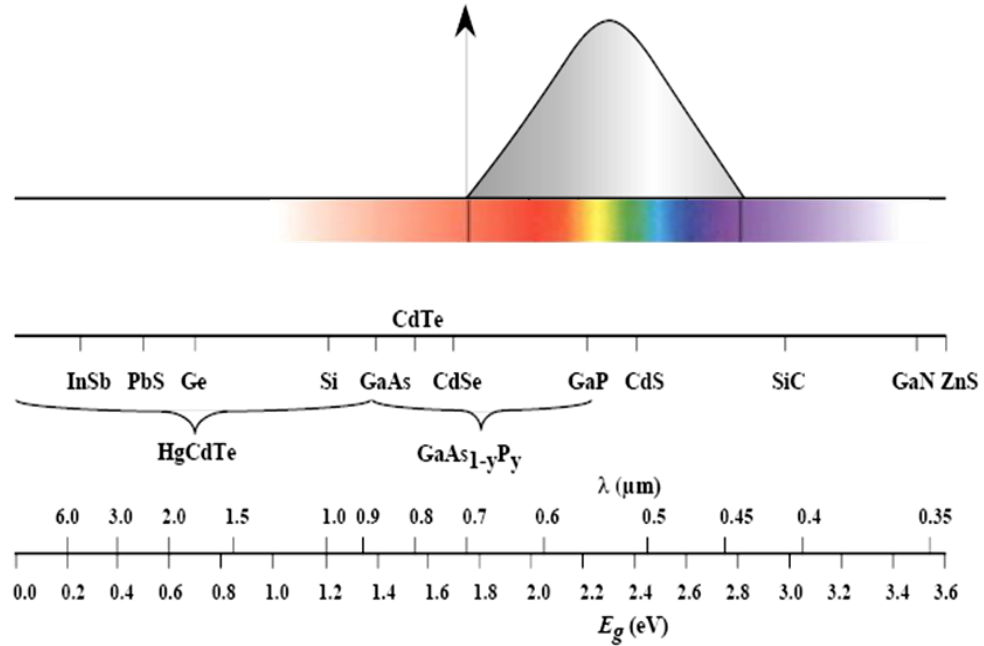
$$\alpha(\hbar\omega) \cong 3 * 10^6 \left(\frac{m_r^*}{m_0} \right)^{1/2} \frac{(\hbar\omega - E_g)^{1/2}}{\hbar\omega} \text{ cm}^{-1} \quad (5.7)$$

Buradam_r^{*} indirgenmiş e-h kütlesi, $\hbar\omega$ gelen fotonun enerjisi ve E_g ilgili yarıiletkenin bant aralığıdır. k-uzayında dikey geçişleri olmayan yarıiletkenler (indirekt

yarıiletken) için soğurma katsayısı direkt bant aralıklı malzemelere göre ortalama olarak 100 kat daha düşüktür. Denklemden de görüldüğü üzere, λ_c ile verilen bir kesilme (*cutoff*) dalga boyunun üzeri değerlerinde soğrulma katsayısı sıfırdır. E_g yarıiletkenin bant aralığı olmak üzere kesilme dalga boyu aşağıdaki gibi tanımlanır:

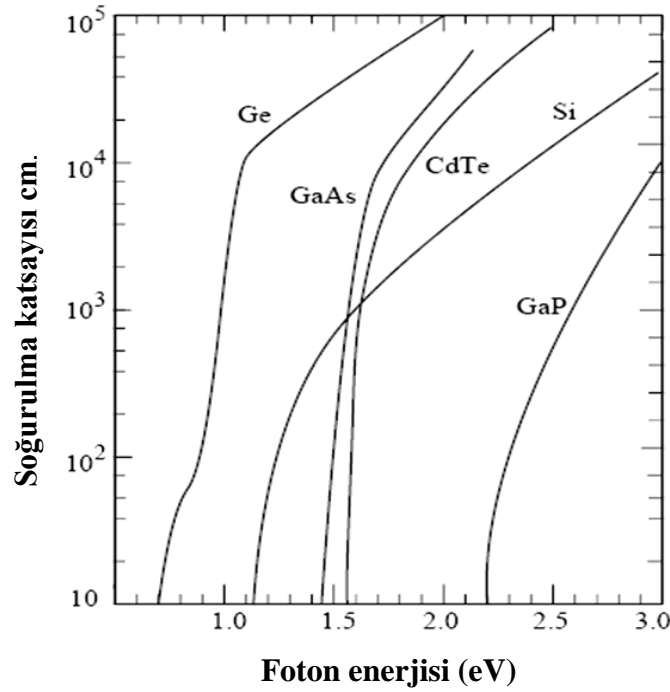
$$\lambda_c = \frac{h c}{E_g} = \frac{1240}{E_g(eV)} \text{ (nm)} \quad (5.8)$$

Şekil 5.15'te insan gözünün cevap-verme/duyarlılığı (*response*) ile bazı yarıiletkenlerin kesilme dalga boyu bulunmaktadır. Ayrıca Şekil 5.16'da bazı yarıiletkenlerin soğurma katsayısı bulunmaktadır. İndirekt malzemelerin optik soğurulmasının düşük olması bunların dedektör olarak kullanılmayacağı anlamına gelmez. Nitekim Si ve Ge dedektörleri piyasada bulunmaktadır.



Şekil 5.15 İnsan gözünün cevap-verme/duyarlılığı (*response*) ile bazı yarıiletkenlerin kesilme dalga boyu bulunmaktadır. (Singh, 1995).

“Banttandan banda” geçiş yani bir elektronun değerlik bandından iletim bandına geçiş tarzında foton algılama, dedektör yapımı için tek yol değildir. Zira bir yarıiletkenin katkılanması sonucunda oluşan ve bant aralığı içinde bulunan düzeyler ile de geçiş olasıdır. Katkılı (*extrinsic*) dedektör olarak bilinen ve oldukça önemli olan bu dedektörler özellikle uzun dalgaboylu ışınları algılamak için kullanılmaktadır (örneğin termal kameralar). Bu tarz dedektörlerde, safsızlık seviyesi bant aralığı içine denk düştüğü için ışınım enerjisi daima bant aralığından daha düşüktür.



şekil 5.16 Bazı yarıiletkenlerin soğurma katsayıları (Singh, 2003).

Işık bir yarıiletkene düştüğünde e-h çiftleri oluşur. Dedektörün performansı, bunların toplanması ve malzemenin iletken liğinin değişmesine başka bir deyişle bir sinyali üretmesine bağlıdır. Bir elektrik alanının veya bir konsantrasyon gradyentinin yokluğunda üretilen e-h çiftleri algılanabilecek bir sinyal üretmeden yeniden birleşeceklerdir. Dedektörlerde, cevap-verme/duyarlılık (responsivity) ve kuantum

verimi aygıt performansını belirleyen önemli noktalar. Aşağıdaki gibi tanımlanan cevap-verme R_{ph} , optik güç ile üretilen akımı ifade eder.

$$R_{ph} = \frac{I_L/A}{P_{op}} = \frac{J_L}{P_{op}} \quad (5.9)$$

Burada I_L aygıtın A alanında üretilen fotoakım, J_L fotoakım yoğunluğu ve P_{op} da bu alana vuran optik demetin şiddetidir (birimi W/cm^2). Dedektörün kuantum verimi ise

$$\eta_Q = \frac{J_L/e}{P_{op}/\hbar\omega} = R_{ph} \frac{\hbar\omega}{e} \quad (5.10)$$

şeklinde tanımlanır. Kuantum verimliliği önemli bir parametredir. Çünkü bu parametre, dedektöre vuran her bir foton ile ne kadar taşıyıcı toplanabileceğinin bir ölçütüdür. Bu noktaların iyileştirilmesi çok önemli tasarım konularıdır.

Bir dedektörün cevap-vermesi, vuran fotonların dalga boyuyla doğrudan alakalıdır. Şayet, fotonların dalgaboyu kesilim dalga boyundan büyük ise bu fotonlar soğrulamaz ve dolayısıyla fotoakım da oluşamaz. Şayet gelen fotonların dalgaboyu kesilim dalga boyundan daha küçük ise başka bir deyişle foton enerjisi bant aralığı enerjisinden daha büyük ise aygıt ısınacaktır. Yani gelen fotonların enerjileri E_g 'nin üzerine çıksa bile üretilen e-h çifti aynı kalmakta ve dolayısıyla da cevap-verme düşmeye başlamaktadır.

Daha önce değinildiği üzere, ışık ile üretilen e-h çiftleri tekrar birleşir. Ama bu durum dedektörler için uygun değildir. Çünkü aygıtı düşen ışık elektriksel sinyale dönüştürülmeden yitirilir. İşte bu yitirmeyi engellemek için bir elektrik alanı gereklidir. Elektrik alan, oluşan elektron ve deşiklerin zıt kutuplarda toplanmasını sağlamaktadır. Elektronlar ve deşikler zıt yüklerde oldukları için elektrik alanı içerisinde yeniden-birleşme gerçekleştirilmeden zıt yönlere saparlar. Genel olarak, böyle bir prosedür aşağıda verilen iki şekilde oluşturulabilir:

- ✓ Katkısız bir yarıiletkene ters besleme uygulayarak

- ✓ Ters besleme altında bir p-n diyot kullanarak

Bunlardan ilk seçim fotoiletken dedektör tarzıdır. Bu tarzda, oluşan e-h çiftleri yarıiletkenin iletkenliğini değiştirmesi sonucu sinyal elde edilir. İkinci seçim ise, p-n diyot (veya p-i-n) yaygın olarak kullanılan bir dedektör tarzıdır. Daha önce de değinildiği gibi p-n eklemının tüketim bölgesinde bir iç elektrik alanı (built-in) kurulmaktaydı. Bu tarzda çalışan dedektörler, oluşan e-h çiftleri uygulanan bir ters beslem ile beraber iç elektrik alanı etkisiyle yeniden-birleşme sürecinin gerçekleşmesine izin verilmeden yüklerin toplanmasını mümkün kılar.

5.2.3.2. p-n Diyotta Fotoakım

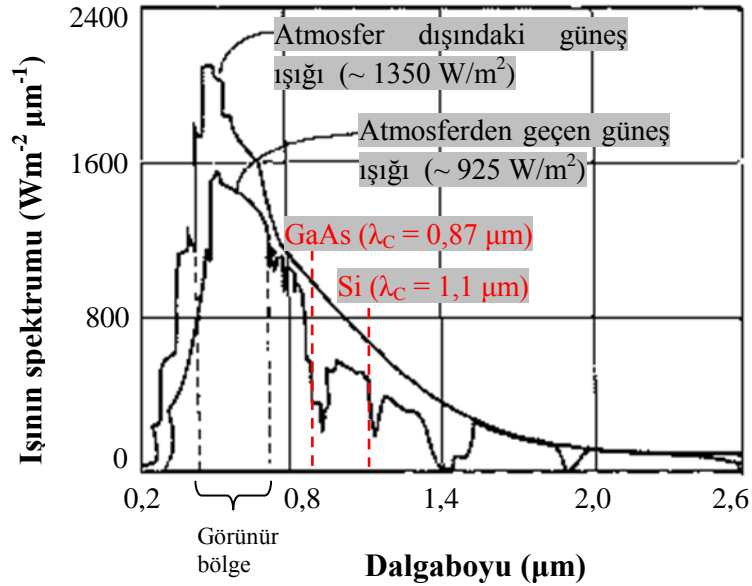
Bir yarıiletkene ışık düştüğünde e-h çiftleri oluşur ve bu taşıyıcılardan bazıları kontakta toplanarak fotoakım oluşmasına neden olur. Tüketim bölgesinde üretilen e-h çiftleri yine bu bölgedeki elektrik alanı tarafından hızlı bir şekilde süpürülür. Böylece elektronlar n-bölgesine, deşikler p-bölgesine toplanır. Yüksek elektrik alanı altında elektron ve deşiklerin çoğunluğu fotoakıma katkıda bulunduğu için cevap-verme çok hızlıdır. Tüketim bölgesinde üretilen taşıyıcılara ilaveten nötr n- ve p-bölgelerinde de e-h çiftleri üretilebilir. Yalnız bu bölgelerde ki elektrik alanı aşırı derecede zayıf olduğu için fotoakıma katkı oldukça düşük olmaktadır.

Bir fotodiyot, fotovoltaiik mod ve fotoiletken mod olmak üzere iki farklı konfigürasyonda kullanılabilir. Fotovoltaiik mod, güneş pilleri için kullanılır ve burada bir dış beslem uygulanmaz. Diyotta oluşan fotoakım, dış devreye bağlı yüksek bir direnç üzerinde güç üretebilir. Fotoiletken mod ise dedektörler için kullanılır. Burada diyot bir güç kaynağına bağlanılarak (ters beslemeli) fotoakım toplanır.

p-n diyotunun önemli bir kullanım alanı güneş pilleridir. Bu pillerde optik enerji, elektrik enerjisine dönüştürülür. Güneş pillerinde dönüşüm verimi önemli bir parametredir. Bu bağlamda gelen fotonların enerjileri yarıiletkenin bant aralığından küçük ise e-h çifti oluşmayacak; büyük ise bu fark ($h\nu - E_g$) ısı şeklinde ziyan

olacaktır. Kısacası güneş pillerinin dönüşüm verimi bant aralığı ile doğrudan orantılıdır. Şekil 5.17’de güneş enerjisinin ışın spektrumu bulunmaktadır. Şekilde görüldüğü üzere atmosferden geçen güneş ışınları görünür bölgede tepe yapmaktadır (yoğunlaşmaktadır). Yine şekilde GaAs ve Si için kesilme dalga boyu λ_c ’nin görünür bölgeye uzak olduğunu görülmektedir. Aslında iyi bir güneş pili, tüm güneş ışınlarını (özellikle görünür bölge) algılayabilir olmalıdır. Görünür bölgeyi algılayabilecek yarıiletkenler, Si yarıiletkenine göre fazlasıyla pahalıdır. Tabi ki, bu sınıf güneş pilleri kullanılmıyor değildir. Nitekim uzay sanayinde kullanılmaktadır. Bu durum, uzay sanayinin pahalı olmasının temel nedenlerindedir.

Günümüzde yenilenemez enerji kaynaklarının (kömür, petrol vb.) beraberinde getirdiği geri döndürülemez zararlar güneş pillerinin önemini daha da artırmaktadır. Görünür bölgedeki ışınları tamamen soğurabilen güneş pillerinin çok ucuza üretilmesi, bu korkutucu tabloyu düzeltebilecek önemli bir uğraştır.



Şekil 5.17 Güneş enerjisinin ışın spektrumu (Singh, 1995).

5.2.3.3. Fotoiletken dedektörler

En basit yarıiletken dedektör olan bu tarz dedektörler, uçlarına bir gerilim uygulanan yarıiletkenden oluşmaktadır. Yarıiletkene uygun dalga boyundaki ışığın çarpmasıyla oluşan e-h çiftleri elektrik alan yardımıyla toplanır. Bu şekilde oluşan akımdaki değişim bir devre ile algılanabilir.

Fotoiletken dedektörlerin önemli bir avantajı aygıttaki kazançtır. Yani gelen her bir foton için daha fazla elektron toplanabilir. Bu sonuca varabilmek için yapının çalışma mekanizmasının iyi bilinmesi gereklidir. Kısaca bu mekanizmayı şöyle açıklayabiliriz: iletim bandı bölgesine düşen ışık e-h çiftleri oluşturarak yapının iletkenliğini değiştirir. Aygıttaki elektrik alanı elektronların ve deşiklerin zıt yönlere hareket etmesini sağlayarak akım oluşmasına neden olur. Oluşan taşıyıcılar, yeniden-birleşene kadar ya da kontakta toplanıncaya kadar uzun bir süre sistemin içinde kalır. Bu tarz dedektörlerde, zıt katkılama yapılmadan genellikle hafifçe n-tipi katkılanır (yani aygıtta p-tipi katkılanmış bölge yoktur). Bilindiği gibi n-tipi bir yarıiletkende iletim başat olarak elektronlar tarafından gerçekleştirilir. Böyle bir katkılanmış yarıiletkendeki safsızlık seviyesi genellikle iletim bandı çok yakındır ve küçük bir miktardaki enerjiyle (örneğin oda sıcaklığı) iyonize olurlar. Öyle ki, bir ışık sinyali yokken, karanlıkta (*dark*) bile bir iletkenlik söz konusudur.

Bu dedektörlerde, ışık ile oluşan elektronlar yine ışık ile oluşan deşikler ile yeniden-birleşmeden önce birkaç kez devrede dolaşırlar. Dolayısıyla bu elektronun devreye her bir girişinde akıma katkıda bulunacağı düşünüldüğünde bu dedektörlerdeki kazancın oldukça yüksek olması garipsenemez (Örneğin; n-i-n fotoiletken dedektörde, p-n eklemesindeki gibi bir iç elektrik alan kurulmadığından gelen ışık ile oluşan taşıyıcılar uzun bir süre sistem içerisinde kalırlar). Özetlersek n-i-n fotoiletken dedektörlerde oldukça büyük bir kazanç elde edilmektedir. Lakin büyük bir karanlık akım gürültüsü (*dark current noise*) de bulunmaktadır. Bu engeli

aşmak için ters beslem altındaki p-n veya p-i-n diyot kullanan dedektörler geliştirilmiştir.

5.2.3.4. p-i-n Fotodetektörler

Çok önemli bir dedektör sınıfı olan bu tarz dedektörlerin temelinde ters beslem bir p-n veya p-i-n diyot yatmaktadır. Yalnız, ters beslem değeri χ_g (*avalanche*) dedektörlerinde olduğu gibi bir kırılma etkisi (*breakdown*) yapacak kadar güçlü değildir.

Şekil 5.18'de bir p-i-n dedektör bulunmaktadır. Aygıt ters besleme altında olduğundan, karanlıktaki diyot akımı uygulanan gerilimden bağımsızdır. Işık düştüğünde, tüketim bölgesinde (i-bölgesi) üretilen taşıyıcılar fotoakım oluşmasını sağlar. Ters besleme, yapı üzerinde güçlü bir elektrik alanı oluşturduğundan i-bölgesindeki tüm taşıyıcılar hızlı bir şekilde toplanır (süpürülür). i-bölgesi taşıyıcıların difüzyon uzunluğundan daha büyük olduğu için ve yeterince güçlü bir elektrik alanı uygulandığı için aygıt cevap-vermesi oldukça hızlıdır. Burada, yüzeyin yansıtıcılığı sisteme düşen fotonların nüfuz edebilmesi bakımından önem taşımaktadır.

Kısaca, yüksek verim için uzun bir i-bölgesi ve yüzey yansıtıcısının küçük olması öngörülür. Özel yansıtıcı önleme kaplamalarıyla bu işlem kolaylaştırılır. Bununla birlikte, i-bölgesi aşırı derecede uzun olursa, taşıyıcılar kontağa geçecekleri için aygıt hızında önemli derecede azalma olması kaçınılmazdır. Bu durum, yüksek hızda çalışan aygıtlar için önemli bir kriterdir. Örneğin; yüksek hızlı aygıtların (10 GHz üzeri hızlarda işlem yapan) i-bölgesi mikron veya daha düşük bir ölçekte dir. (Singh, 1994)

Dedektör tasarımındaki en önemli nokta, algılanacak frekanslar için iyi bir soğurma katsayısına sahip bir malzeme seçilmesidir. Yüksek hızlara gerek duyulmayan LAN'larda (yerel-bölge ağlar) kullanılan GaAs tabanlı lazerlerle üretilen

- 1) Yüzey yansıması minimize edilmelidir: Yüzey yansımalarını azaltmak için anti-reflektör kaplama yapılır.
- 2) Tüketim bölgesindeki soğurma maksimize edilmelidir: Yüksek dedektör verimi için, tüketim bölgesi mümkün olduğu kadar yüksek oranda soğurma yapabilmesi için geniş olmalıdır. Yalnız unutulmamalıdır ki bu bölgenin çok uzun olması, taşıyıcıların kontağa geç ulaşmasını sağlayacağı için aygıt hızını azaltacaktır.
- 3) Taşıyıcıların yeniden-birleşmesi azaltılmalıdır: Vuran ışığın oluşturduğu elektron ve deşiklerin yeniden-birleşmesini önlemek dedektörler için gayet önemlidir. Aksi takdirde ışık algılanamaz. Yeniden-birleşme sürecini önlemek için, hem ters beslem yeterince yüksek olmalı hem de kullanılan malzeme yüksek saflıkta olmalıdır. Yüksek saf malzemeler kullanılarak, tuzaklardan kaynaklanan olası yeniden-birleşmelerin önüne geçilir.
- 4) Geçiş süresi küçük olmalıdır: Yüksek cevap hızı gereken aygıtların tüketim bölgesi mümkün olduğu kadar kısa olmalıdır. Unutulmamalıdır ki, 2 ve 4 numaralı maddelerin tezatlığı, arzulanan özelliklere sahip aygıt yapılırken daha iyi anlaşılacaktır. Söz gelimi; sürenin değil de taşıyıcı sayısının yani güçlü bir sinyalin gerek duyulduğu aygıtlarda 2. madde geçerlidir. Şayet, aygıtın cevap süresi çok önemli ise 4. madde geçerlidir.

Bu maddelere ilaveten aygıtın bağlı olduğu dış devre de belirleyicidir. Yüksek cevap frekansı için devrede kullanılan direnç ve sığa yeterince küçük seçilerek geçiş süresi küçültülebilir.

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Kuantum kuyuları ve süperörgülerin keşfiyle orantılı olarak yarıiletken teknolojisinde bir devrim yaşanmıştır ve bu sayede birçok yeni aygıt geliştirilmiştir. Lazer diyotlar, LED'ler, detektörler, FET'ler (alan etkili transistörler), foto-transistörler ve dalga-kılavuzlar (frekans yönlendiriciler) bu aygıtlara örnek verilebilir. Bu tür aygıtlarında temelini oluşturan heteroyapıların (farklı cinsteki tabakaların oluşturduğu yapılar) üretilmesi son derece önem arz etmektedir. Bu yapıları üretebilmek için Sıvı Faz Epitaksi (LPE), Buhar Faz Epitaksi (VPE), Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD), Moleküler Demet Epitaksi (MBE), Metalorganik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD) gibi önemli büyütme teknikleri kullanılmaktadır. Bu tekniklerin her birinin birbirine göre üstünlükleri ve zayıflıkları vardır. Bu teknikler her geçen gün çağın gereksinimlerini karşılayacak aygıtları üretebilmek için geliştirilmekte hatta birkaç sistemin üstünlüklerinin birleşmesiyle yeni hibrit sistemler oluşturulmaktadır. Bu çalışma kapsamında özellikle III-V ve III-N-V veya kısaca III-N'lerin MOCVD ile büyütülmeleri ve elde edilen yapıların uygulama alanları incelenmiştir. Bu bağlamda ileriki aşamada yapılması önerilen araştırmalar özetle ve gerekçeleri ile birlikte aşağıda verilmeye çalışılmıştır.

Buraya kadar genel olarak incelediğimiz optoelektronik devre elemanlarına yeni katkılar nelerdir? Özellikle III-N malzemeleri anlatırken değindiğimiz bu konu belki de en önemli gelişmedir. Açarsak, III-N tipi malzemelerin özellikle MOCVD büyütmelerinde ardı ardına gelen, AlN buffer tabakasının bulunuşu, p tipi katkılamada başarıya ulaşılması, çok geniş ve direkt bant aralığına sahip bu materyalin kullanılması ve sonunda çok uzun süredir endüstrinin beklediği mavi LED ve LD'nin yapılışı neredeyse bu konuda yepyeni bir çığır açmıştır. Özellikle soğuk aydınlatma tipi olarak tanımlayabileceğimiz LED ile beyaz ışık elde edilmesi artık mümkün olmuş ve çok kısa bir sürede şiddet de kompakt floresans lamba düzeyine getirilmiştir. Dolayısı ile çok aktif bir araştırma alanı açılmıştır. Yapılması gereken

birçok konuda araştırmalar hızla devam etmektedir, elde edilen bu kaynakların uzun ömürlü olmaları, yeni dizaynlar ile dış şartlara (Soğuk, sıcak, darbe dayanıklılığı vs.) dayanıklılık ve daha çok aydınlatma şiddeti eldesi bu başlıklardan sadece bir kaç tanesidir. GaN ve AlGaN malzemelerin büyütülmesinde yüksek alttaş sıcaklıkları gerekmektedir, üniversitemizde kurulan sistemde özellikle bu konu gözetilerek, 1400 °C dereceye kadar ± 1 °C kontrollü ısıtma yapabileceğimiz için, bu alanda yapılan araştırmalara girilmesi için oldukça iyi bir alt yapı imkânına sahip olduğumuz aşikârdır.

Bir diğerk çok önemli araştırma konusu “Dilute Nitrides” ismi ile bilinen seyreltik Nitritler’dir. Bu malzeme grubu özellikle telsiz iletişimde kullanılan yüksek frekans elektroniğinde çok önemlidir. GaAs ve InP bu alanda iyi bilinen materyaller olmasına karşın, sınırlı bant aralıkları ve örgü sabitleri yüzünden istenilen modülasyonları yapmanın zorluğu çok kolayca V grubundan bir element olan N’un çok az miktarlarda GaAs veya InGaAs a eklenmesi sureti ile aşılabilir. Bu malzemelere seyreltik Nitritler ismini veriyoruz. Özellikle, son birkaç yıl öncesine kadar InN’ın sahip olduğu düşünölen bant aralığından daha küçük bir aralığa (0,6 eV) sahip olduğunun ortaya çıkması ile bu gruba InGaN’lar da katılmıştır. Bunun doğal sonucu olarak çok geniş bir aralıkta aygıt tasarlama imkânı doğmuştur. Özellikle 4’lü hatta bazen 5’li bu yapılarla örgü uyumu da kısmen halledilebilmiştir. Bu alan çalışmaların hızla arttığı bir alan olmaya da devam edecektir. Üniversitemizde kurulan MOCVD sistemi bu alan da düşünölen satın alınmış özellikle ilave ettirilen seyreltik azot hattı ile Seyreltik Nitritlerin büyütölebilmesine olanak sağlayacak şekilde tasarlanmıştır.

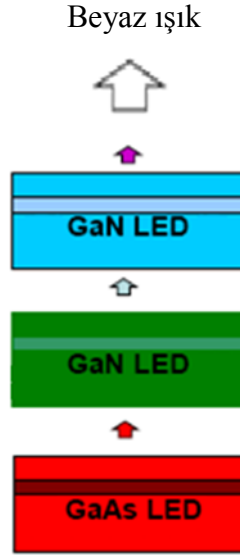
p-tipi katkılamadan sonra AlN ve AlGaN tabanlı UV fotodetektörler oldukça önem kazanmıştır. Özellikle güneş körü “Solar Blind” detektörler üzerinde yoğun bir çalışma vardır. Bunun temel sebebi; bu detektörlerin 240-290 nm’lik atmosferik pencerede çalışabilmeleridir. Bu aralığın diğerk dalga boylarında yayınıma izin vermemesi önemli bazı uygulamalara izin vermektedir. Örneğın, bu bölgede çalışan

detektörler, hatırı sayılır uzaklıkta bulunan bir jet motorunun ya da roket sisteminin ısını algılayacak kadar hassas olmalarından dolayı askeri alanda çok önemli ve stratejik bir uygulamadır. Bu sisteme dayanılarak erken uyarı sistemleri geliştirilmektedir. Stratejik öneme sahip olan bu alanda bilgi paylaşımı da olamayacağına göre ulusal olarak böyle bir çalışmanın yürütülmesi gayet büyük bir öneme haizdir. Güneş körü vericiler ise atmosferde kolayca ve kısa erişimde dağılan bu nedenle de ilgili bölge dışında dinlenmesi, algılanması olanaksız olan bir haberleşme sistemi olarak kullanılmakta olup, önemli askeri uygulamalar arasında sayılmaktadır. Ticari uygulamalarda ise, güneş körü detektörler ile atmosferik ozon kirlenmesi izleme, kimyasal/biyolojik dezenfektasyonda ve yangın algılamada kullanılabilir.

Çalışma içinde güneş pillerinin önemi ve tasarımı bahsedilmiştir. Şu ana kadar bir çok materyal ile güneş pili yapılmıştır ancak, özellikle III-N grubundan InGaN'ın 0.7-3,4 eV geniş aralığında, direkt bant yapısına sahip olması nedeni ile kullanılabilir tüm güneş enerjisini kapsayacak bir bölgede güneş pili yapmak mümkündür. Bu nedenle de çeşitli tasarım teknikleri kullanılarak, birden fazla eklemlili yapı barındıran bu nedenle de daha çok fotoakım elde edilebilen daha verimli güneş pillerinin yapılması olasıdır. Ayrıca, yüksek radyasyona dayanma ve fiziksel dayanıklılık gibi nedenlerle de kendisinden önce kullanılan materyallere göre çok daha üstün olan bu grup, uzay araştırmaları için de çok önemli bir materyal konumuna yükselmiştir. Ancak, tüm bu güzel özelliklerine rağmen henüz araştırmalar yeterince olgunlaşmadığından, III-V grubu yapılar ile kıyaslandığında daha az verim söz konusudur. Bu alanda aktif çalışmalar devam etmektedir.

Diğer bir hedef çalışma alanı ise yine III-N grubunun sağladığı geniş bant aralığı ile elde edilen mavi LED ve LD üreten devre elemanları tasarlanması ve büyütülmesidir. Mavi LD'nin gelişmesi optik data kayıt ortamı için uzun zamandır beklenen bir gelişme idi ve yaygınlaşmaya başlaması çok kısa bir sürede gerçekleşti. Aydınlanma ise bu buluş ile tamamlanan bir diğer uygulama alanı oldu. Mavi LED

öncesinde de çeşitli fosfor malzemeler kullanılarak beyaz ışık elde ediliyordu, ancak kısa yaşam süreleri ve zamana bağlı olarak değişen aydınlatma verimleri nedeni ile bir çok soruna sahip olan bu materyaller yerine, düşük tüketimli, uzun yaşam süreli ve zamana bağlı aydınlatmasında çok kararlı olan LED'lerin girmesi (Şekil 6.1) kaçınılmazdı ve öyle de oldu. Henüz son kullanıcıya istenilen düzeyde erişmemiş olsa da, 10 yıl içerisinde aydınlatma kavramının tamamen değişeceği çok açıktır. Şimdiden trafik ışıklarında, bahçe aydınlatmasında, cep telefonu ve LCD panellerin arka plan ışıklandırmasında kullanılan bu ışık kaynaklarının uygulama alanları sadece hayallerimizle sınırlıdır demek çokta abartı olmaz.



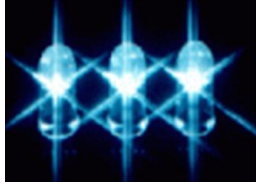
Şekil 6.1 LED'lerle beyaz ışık elde edilmesinin bir yolu.



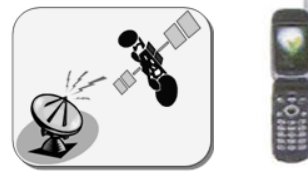
Yüksek-kapasiteli
optik depolama



Kimyasal/biyolojik
dezenfektasyon



Aydınlatma



Kablosuz iletişim sistemleri



Füze ikaz
sistemleri



Su arıtımı



Güç-hatlarını
gözleme



Yangın
gözleme

Şekil 6.2 III – N'lerin bazı uygulama alanları

Çalışma alanları Şekil 6.2’de özeti verildiği gibi burada anlatılanlarla sınırlı olmayan, biyosensörler, biyolojik arıtma vs. konuları da kapsayan III-N grubunda ve önce detayları açıklanan alanlarda çalışılarak konuda uzman olunması, daha sonra çok disiplinli olarak, elektronik, malzeme, biyoloji, kimya ve tıp alanlarında ortak çalışmalar ile devam edilmesi gerekmektedir. Bu uygulamaları yapabilecek bir alt yapının üniversitemizde olması ülke olarak çok geciktiğimiz bu çalışma alanında, üniversite olarak öncü konuma yükselmemize olanak sağlayacak kapasitededir ve umutlarımız bu hayalin ivediyle gerçekleştirilmesidir.

KAYNAKÇA

Akasaki, I., Progress in crystal growth and future prospects of group III nitrides by metalorganic vapor-phase epitaxy. Journal of Crystal Growth, 1998. 195(1-4)

Amano, H., Sawaki, N., Akasaki, I. ve Toyoda, Y. (1986) Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer. Appl. Phys. Lett., 48, 353.

Ambacher O., J. Smart, J. R. Shealy, N. G. Weimann, K. Chu, M. Murphy, W. J. Scha, and L. F. Eastman, 1999, Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N- and Ga-face AlGaIn/GaN heterostructures, J. Appl. Phys. 85, 3222.

Bath R, Koza A, ve Skromme B J, 1987, Appl, Phys, Left, 50 1386

Benz K W, Haspeklo H ve Bosch R, 1982 J, Physique Coll, 43 C5 393

Bernát j., 2005, Fabrication and Characterisation of AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors for Power Applications, Doktora tezi, RWTH Aachen University

Bhat R, Koza M A, Chang C. C., Schwarz A ve Harris T D 1986 J, Crystal Growth 77 7

Bhattacharya P., 1997, 'Semiconductor Optoelectronic Devices', Prentice-Hall, Inc.

Brauers A, Kayser O, Kall R, Heinecke H, Balk P ve Hofmann H, 1988 J, Crystal Growth 93

Byrappa K. ve Ohachi T., 2003, Crystal Growth Technology, Springer

Callahan F J, 1985, Swagelok Tube Fitting ve Installation Manual.

Casey, H. C., ve M. B. Panish, 1978, Heterostucture Lasers, New York: Academic Press.

Chen C H , Larsen C A, Stringfellow G B, Brown D W ve Robertson A J, 1986, J Crystal Growth 77 11

Cho Y. S., 2007, MOVPE Growth and Characterization of Cr-doped GaN, Doktora tezi, RWTH Aachen University.

Cho, A. Y., 1985, The Technology and Physics of Molecular Beam Epitaxy, New York: Plenum Press.

Chui T H, Tsang W T, Schubert E F ve Agyekum E, 1987, Appl, Phys, Lett, 51 1109

Çörekçi S., 2008, “Grup III-V Bileşik Yarıiletkenlerde AFM Yüzey Karakterizasyonu”, Doktora tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.

Dikme Y., 2006, MOVPE and Characterization of GaN-based Structures on Alternative Substrates, Doktora tezi, RWTH Aachen University

Fahrner W. R., 2005, Nanotechnology and Nanoelectronics Materials, Devices, Measurement Techniques, Springer

Foxton C. T., and J. J. Harris, 1984, *J. Cryst. Growth*, Vol. 81.

Frijink P M, 1988, *J Crystal Growth* 93 207

Fujita S, Imaizumi M, Araki S, Tekada Y ve Sasaki A, 1988, *J. Crystal Growth* 93 1

Giling L J, 1985, *Crystal Growth of Electronic Materials* ed E Kaldis (Amsterdam, North- Holland).

Harrison B C ve Tompkins E H, 1962, *Inorg. Chem* 1 951

Hook J.R. ve Hall H.E., 1999, *Katıhal Fiziği*, Literatür Yayıncılık.

İmer B., 2006, Improved Quality Non-polar III-Nitride Heteroepitaxial Films and Devices, Doktora tezi, University Of California, Santa Barbara.

Jackson K. A., 1998, Compound Semiconductor Devices: Structures and Processing, Wiley-VCH, Weinheim,

Jackson K. A., 2004, Kinetic Processes , Wiley-VCH, Weinheim, Germany.

Jensen K F, Fotiadis D I ve Mountziaris T J, Crystal Growth 107 1

Kasap S. ve Capper P., 2006, Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials, Springer Science+Business Media, Inc.

Kittel C.,1986, Introduction to Solid State Physics, Çeviri: Bekir Karaoğlu, John Wiley & Sons, Inc.

Knauf J, Schmitz D, Strauch G, Jurgensen H ve Heyen M 1988 J, Crystal Growth 93 34

Kroemer H, 1963, A proposed class of heterojunction injection lasers, Proceedings of the IEEE, Vol. 51, pp. 1782-1783.

Kuech T F, Wu E, Kuan T S, Deline V ve Potemski R 1986 Crystal Growth 77 257

Kurtz S R, Olson J M and Kibbler A, 1989, J Electron, Mater, 18 15

Lee C. M., 2004, Investigation of InGaN/GaN Light Emitting Diode, doktora tezi, Electrical Engineering

Lee M K, Huang K C, Wu D S, Tung H H and Yu K Y, 1988 J, Crystal Growth 93 539

Lişesivdin S. B., 2005, MBE tekniği ile büyütülen InGaAs/GaAs ve AlGaAs/GaAs yarıiletkenlerinin iletim özellikleri, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi.

Ludewise M I, 1985, J, Appl, Phys, 58 R31

Lum R H, Klingert J K, ve Lamont M G, 1987, Appl, Phys, Lett, 50 284

Maiman T.H., 1960, Stimulated optical radiation in ruby masers, Nature, 187.

Manasevit, H.M., Erdmann, P.M. ve Simpson, W.I. (1971) The use of metalorganics in the preparation of semiconductor materials. IV. The nitrides of aluminum and gallium. J. Electrochem. Soc, 118, 1864.

Manasreh O., 2005, Semiconductor Heterojunctions and Nanostructures, University of Arkansas, McGraw-Hill

Maury F ve El Hammadi A, 1988, J Crystal Growth 91 105

Mitin V. V., Kochelap V. A. ve Stroscio M. A., 1999, Quantum Heterostructures: Microelectronics and Optoelectronics, Cambridge University Press.

Mori K, Yoshida M ve Usui A, 1988, Gallium Arsenide and Related Compounds 1987 (Inst, Phys Conf, Ser, 91) (Bristol: Institute of Physics)

Morkoc H., 1999, Nitride Semiconductors and Devices, Springer.

Nakamura, S., First III-V-nitride-based violet laser diodes. Journal of Crystal Growth, 1997. 170(1-4)

Neamen D. A., 2003, Semiconductor Physics and Devices Basic Principles, McGraw-Hill

Nelson, H., 1963, "Epitaxial Growth from the Liquid State and Its Applications to the Fabrication of Tunnel and Laser Diodes," RCA Rev., Vol. 24

Pankove, J.I. ve Schade, H.E.P. (1974) Appl. Phys. Lett., 25, 53.

Piprek Joachim, 2003, Semiconductor Optoelectronic Devices Introduction to Physics and Simulation, Academic Press

Plass C, Heinecke H, kayser O, Luth H ve Balk P 1988 J, Crystal Growth 88 455

Quirk M. ve Serda J., 2001, Semiconductor Manufacturing Technology, Prentice Hall.

Ralph Joseph Meijers, 2007, Growth and Characterisation of Group-III Nitride-based Nanowires for Devices, Doktora tezi, RWTH Aachen University.

Razeghi M., 1989, The MOCVD Challenge Volume 1: A survey of GaInAsP-InP for photonic and electronic applications, Adam Hilger Press.

Razeghi M., 1995, The MOCVD Challenge Volume II: A survey of GaAs and related compounds and of GaInP for photonic and electronic applications, Institute of Physics Publishing.

Razeghi M. ve Henini M., 2004, Optoelectronic Devices: III-Nitrides, Elsevier Ltd.

Rosenberger F., 1979, Fundamentals of Crystal Growth (Berlin: Springer)

Schlichting H, 1968, Boundary Layer Theory 6th edn (New York: McGraw- Hill)

Serway R.A., 1990, Fen ve Mühendislik için Fizik 3, Palme Yayıncılık

Singh J, 1994, Semiconductor Devices An Introduction, McGraw-Hill.

Singh J, 1995, Semiconductor Optoelectronics Physics and Technology, McGraw-Hill.

Singh J, 2003, Electronic and Optoelectronic Properties of Semiconductor Structures, Cambridge University Press.

Stringfellow, G. B., 1985, Crystal Growth of Electronic Materials, Elsevier.

Stringfellow, G. B., 1989, Organometallic Vapor-Phase Epitaxy: Theory and Practice, San Diego, CA: Academic Press.

Sze S. M., 1981, Physics of Semiconductor Devices, John Wiley & Sons Inc.

Takahashi K., Yoshikawa A. ve Sandhu A, 2007, Wide Bandgap Semiconductors, Springer.

Tanaka H, Kikkawa T, Kasai K ve Komeno J, 1989, Japan, J, Appl, Phys 28 L901

Tietjen J. J. ve Amick J. A., 1966, J Electrochem. Soc. 133 724

Waltereit P., O. Brandt, M. Ramsteiner, A. Trampert, H. T. Grahn, J. Menniger, M. Reiche, R. Uecker, P. Reiche, and K. H. Ploog, 2000, Phys. Stat. Sol. (a) 180, 133

Wilson J. ve Hawkes J.F.B., 2000, Optoelectronics, Çeviri: Dr. İbrahim Okur, Değişim Yayınları.

Wolfram P, Reier F W, Franke D and Schumann H, 1989 J, Crystal Growth 96 961

Yoshida, S., Misawa, S. ve Gonda, S. (1983) Improvements on the electrical and luminescent properties of reactive molecular beam epitaxially grown GaN films by using AlN-coated sapphire substrates. Appl. Phys. Lett., 42, 427.

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında Yıldızeli ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Sivas'ta tamamladı. 1999-2001 yılları arasında Erciyes Üniversitesi KMYO Bilgisayar Programcılığı bölümünü bitirdi. Daha sonra, 2002-2005 yılları arasında Cumhuriyet Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik bölümünü okuyarak birincilikle mezun oldu. Akabinde, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda yüksek lisansa başladı.