

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

**MOLEKÜLER DEMET EPİTAKSİ TEKNİĞİYLE ÜRETİLEN  $Al_{0.6}Ga_{0.4}As/GaAs$   
TEKLİ KUANTUM KUYULU YAPININ OPTİKSEL VE YAPISAL ÖZELLİKLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Veysel ÇELİK**

**Balıkesir, Haziran-2005**

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

**MOLEKÜLER DEMET EPİTAKSİ TEKNİĞİYLE ÜRETİLEN  $Al_{0.6}Ga_{0.4}As/GaAs$   
TEKLİ KUANTUM KUYULU YAPININ OPTİKSEL VE YAPISAL ÖZELLİKLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Veysel ÇELİK**

**Tez danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Orhan Zeybek**

**İkinci Danışman: Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK**

**Sınav Tarihi : 07.07.2005**

**Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Ali TEKE**

**(BAÜ)**

**Yrd Doç Dr Orhan ZEYBEK**

**(Danışman-BAÜ)**

**Yrd Doç Dr Halil GÜLER**

**(BAÜ)**

Balıkesir, Haziran-2005

## ÖZET

# MOLEKÜLER DEMET EPİTAKSİ TEKNİĞİYLE ÜRETİLEN $Al_{0.6}Ga_{0.4}As/GaAs$ TEKLİ KUANTUM KUYULU YAPININ OPTİKSEL VE YAPISAL ÖZELLİKLERİ

Veysel ÇELİK

Balıkesir Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı

(Yüksek Lisans Tezi/ Tez danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Orhan Zeybek)

(İkinci Danışman: Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK)

Balıkesir, 2005

Bu çalışmada incelenen  $Al_{0.6}Ga_{0.4}As/GaAs$  yarıiletken yapısı Gazi Üniversitesi STARLAB'ta bulunan Moleküler Demet Epitaksi tekniğiyle büyütüldü. Karakterizasyonu STARLAB'ta bulunan fotoluminesans ve elipsometri aygıtları ile yapıldı.

$Al_{0.6}Ga_{0.4}As/GaAs$  yapısının optiksel özellikleri fotoluminesans tekniğiyle incelendi. İnceleme sırasında 650 nm dalga boyunda ve 1.91 eV enerjili ışık kaynağı kullanıldı. Deneysel ölçümler 16 K ve 298 K'de yapıldı sırasıyla bu sıcaklıklarda 1.480 eV ve 1.500 eV değerine sahip pikler elde edildi. Bu sonuçlar kuantum kuyusundaki ilk elektron alt bandı ile ilk ağır hol alt bandı arasındaki enerji farkını göstermiştir.

$Al_{0.6}Ga_{0.4}As/GaAs$  yapısının yapısal özellikleri elipsometri tekniği ile incelendi. Ölçümler 73°, 76° ve 79°'de yapıldı. Bu ölçümler sonucunda  $\Psi$  ve  $\Delta$  grafikleri elde edildi. Daha sonra bilgisayar ortamında üretilen  $Al_{0.6}Ga_{0.4}As/GaAs$  yapısının  $\Psi$  ve  $\Delta$  grafikleri ile deneysel olanlar karşılaştırıldı. Sonuçlar deneysel ve teoriksel grafiklerin uyum içinde olduğunu gösterdi. Bu sonuçlar istediğimiz yapıyı başarıyla büyüttüğümüzü göstermiştir.

**ANAHTAR SÖZCÜKLER:** AlGaAs/GaAs / GaAs / AlAs / Moleküler Demet Epitaksi / Fotoluminesans / Elipsometri / Yarıiletkenler / Düşük Boyutlu Yarıiletkenler

## **ABSTRACT**

### **AN INVESTIGATION OF OPTICAL AND STRUCTURAL PROPERTIES OF THE GROWTH AlGaAs/GaAs MONO QUANTUM WELL SEMICONDUCTOR STRUCTURE BY MOLECULAR BEAM EPITAXY**

**Veysel ÇELİK**

**Balıkesir University, Institute of Science, Department of Physics**

**(Ms. Thesis / Supervisor: Assist. Prof. Dr. Orhan ZEYBEK)**

**(Second Supervisor: Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK)**

**Balıkesir, 2005**

In this study, optical and structural properties of  $\text{Al}_{0,6}\text{Ga}_{0,4}\text{As}/\text{GaAs}$  have been investigated by Molecular Beam Epitaxy at STARLAB, Gazi University. The characterisation of  $\text{Al}_{0,6}\text{Ga}_{0,4}\text{As}/\text{GaAs}$  has been analysed by photoluminescence and ellipsometry at the STARLAB.

An optical properties  $\text{Al}_{0,6}\text{Ga}_{0,4}\text{As}/\text{GaAs}$  semiconductor have been studied by the technique of photoluminescence. The light used to analyse during the photoluminescence has been adjusted to wavelength of 950 nm and energy of 1.910 eV. The experimental measurements have been carried out at temperatures of 16 K and 298 K. The maximum peaks found at 16 K and 298 K is appeared at 1.480 eV and 1.500 eV respectively. The results show the difference between first electron subband and heavy hole subband energy in quantum well.

The structural properties of  $\text{Al}_{0,6}\text{Ga}_{0,4}\text{As}/\text{GaAs}$  semiconductor have been examined by the technique of ellipsometry on the angles of  $73^\circ$ ,  $76^\circ$  and  $79^\circ$ . When these measurements have been completed, the graphics of  $\Psi$  and  $\Delta$  have been obtained. Afterwards, the comparison of the graphics of  $\Psi$  and  $\Delta$  has been carried out between the computerised simulations and experimental results of  $\text{Al}_{0,6}\text{Ga}_{0,4}\text{As}/\text{GaAs}$ . It is found that the results of graphics are in good agreement. It should be concluded that the structure of  $\text{Al}_{0,6}\text{Ga}_{0,4}\text{As}/\text{GaAs}$  has been obtained successfully.

**KEY WORDS :** AlGaAs/GaAs / GaAs / AlAs / Molecular Beam Epitaxy / Photoluminescence / Ellipsometry / Semiconductor / Low dimensional structure

## İÇİNDEKİLER

|  | Sayfa      |
|--|------------|
| <b>ÖZET, ANAHTAR SÖZCÜKLER</b>                           | <b>ii</b>  |
| <b>ABSTRACT, KEY WORDS</b>                               | <b>iii</b> |
| <b>İÇİNDEKİLER</b>                                       | <b>iv</b>  |
| <b>ŞEKİL LİSTESİ</b>                                     | <b>vi</b>  |
| <b>ÖNSÖZ</b>   | <b>xi</b>  |
| <b>1. GİRİŞ</b>  | <b>1</b>   |
| <b>2. YARIİLETKENLER VE DÜŞÜK BOYUTLU YARIİLETKENLER</b> | <b>2</b>   |
| 2.1 Yarıiletkenler                                       | 2          |
| 2.2 Düşük Boyutlu Yarıiletkenler                         | 13         |
| 2.2.1 Kuantum Kuyularının Optiksel Özellikleri           | 23         |
| <b>3. ARAÇLAR VE YÖNTEMLER</b>                           | <b>26</b>  |
| 3.1 Moleküler Demet Epitaksi (MDE)                       | 26         |
| 3.1.1 MDE'nin Ana Parçaları                              | 27         |
| 3.1.1.1 Vakum Sistemi                                    | 27         |
| 3.1.1.2 Pompalama Sistemi                                | 27         |
| 3.1.1.3 Sıvı N <sub>2</sub> Kriyopaneller                | 29         |
| 3.1.1.4 Efüzyon Hücreleri                                | 29         |
| 3.1.1.5 Alttaş Manipulatörü                              | 31         |
| 3.1.1.6 MDE İçinde Bulunan Analiz Aygıtları              | 32         |
| 3.1.2 MDE'deki Büyüme Süreci                             | 35         |
| 3.2 Mikrofabrikasyon                                     | 36         |
| 3.2.1 MDE 'yi Hazırlama                                  | 36         |
| 3.2.2 Oksit Tabakasının Kaldırılması                     | 38         |
| 3.2.3 GaAs Tampon Tabakasını Büyütme                     | 39         |
| 3.2.4 Tabaka Büyütme                                     | 40         |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.2.5 MDE Vakum Sisteminin Soğutulması | 41        |
| 3.3 Analiz Araçları                    | 42        |
| 3.3.1 Fotolüminesans                   | 42        |
| 3.3.2 Elipsometri                      | 44        |
| <b>4. DENEYSEL SONUÇLAR</b>            | <b>47</b> |
| 4.1 Giriş                              | 47        |
| 4.2 Fotolüminesans Sonuçları           | 48        |
| 4.3 Elipsometri Sonuçları              | 52        |
| <b>5. SONUÇ</b>                        | <b>57</b> |
| <b>6. KAYNAKLAR</b>                    | <b>58</b> |



## ŞEKİL LİSTESİ

| <u>Şekil Numarası</u> | <u>Adı</u>  | <u>Sayfa</u> |
|-----------------------|---|--------------|
| Şekil 2.1             | Bir yarıiletkendeki katkılıma: (a) saf yarıiletken; burada elektron ve deşik miktarı biri birine eşittir. (b) p-tipi yarıiletken; burada deşik sayısı elektron sayısından fazladır. (c) n-tipi bir yarıiletken; burada elektron sayısı deşik sayısından fazladır. | 3            |
| Şekil 2.2             | Saf yalıtkanlarda mutlak sıfırda optik soğurma [3].   | 4            |
| Şekil 2.3             | Eşikteki geçişler: (a) doğrudan geçişi gösteriyor. (b) dolaylı geçişi gösteriyor [3].   | 5            |
| Şekil 2.4             | Eksitonun şekillendirilmesi. Elektronun (e) ve deşigin (d) coulomb kuvvetiyle birbirlerine bağlandıkları ve etkin kütlelerinin tersiyle orantılı yarıçapa sahip G ortak yerçekimi merkezi civarında döndükleri varsayılabilir ( $m_h^* > m_e^*$ alınmıştır) [2].  | 7            |
| Şekil 2.5             | (a) Durum yoğunluğu fonksiyonu ve (b) $T=0$ K ve $T>0$ K'de Fermi-Dirac fonksiyonu [2].   | 9            |
| Şekil 2.6             | (a) Durum yoğunluğu, (b) Fermi-Dirac dağılımı ve (c) taşıyıcı yoğunluklarının saf bir yarıiletken için grafik gösterimi [4].  | 10           |
| Şekil 2.7             | (a) n-tipi yarıiletken için durum yoğunluğu, (b) Fermi-Dirac dağılımı ve (c) taşıyıcı yoğunluklarının grafiğini gösteriyor [4].   | 10           |

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Şekil 2.8  | Diyotun grafik gösterimi.   | 14 |
| Şekil 2.9  | Basit bir heteroyapıda oluşan kuyu sistemi [6].   | 15 |
| Şekil 2.10 | Önemli yarıiletkenlerin biri birine göre durumu.  | 17 |
| Şekil 2.11 | Bir süperörgüdeki bant yapısının grafiği.   | 18 |
| Şekil 2.12 | Süperörgülerdeki miniband ve mini boşluklar. Burada $\pi/a$ kristalin temelini oluşturan Brillouin- Bölge sınırlarını gösteriyor [6].                                 | 19 |
| Şekil 2.13 | Bir $Al_xGa_{1-x}As-GaAs-Al_xGa_{1-x}As$ kuantum kuyusu yapısında oluşan süreksiz enerji seviyelerindeki, $\Delta n = 0$ kuralına karşılık gelen izinli geçişler [8]. | 20 |
| Şekil 2.14 | 4.2 K'de farklı genişliklerdeki bir dizi $GaAs/(Ga,Al)As$ kuantum kuyularının optiksel soğurmaları görünüyor.   | 24 |
| Şekil 2.15 | 55 K'da farklı genişlikteki $GaAs/(Ga, Al)As$ kuantum kuyularının bir dizisinin optiksel soğurması görünüyor.   | 25 |
| Şekil 3.1  | Gazi Üniversitesi STARLAB'da bulunan VG80H MDE modeli. (a) alttaşın yerleştirildiği taraftan görüntü. (b) efüzyon hücreleri tarafındaki görüntü.                      | 28 |
| Şekil 3.2  | MDE sisteminin ana hatları.   | 29 |
| Şekil 3.3  | Tipik bir efüzyon hücresi.  | 30 |



|            |   |    |
|------------|---|----|
| Şekil 3.4  | GaAs (üstte) ve AlAs (altta) büyütüldüğü sırada 2x yönelimindeki ayna yansımaları sonucu oluşan RHEED osilasyon yoğunluğu [9].  | 32 |
| Şekil 3.5  | Elektron tabancasından çıkan yüksek enerjili elektronun yüzeye geldikten sonra yüzeyin durumuna göre kırınımı [14].   | 33 |
| Şekil 3.6  | 2x (sol, [110] yönelimi) ve 4x (sağ, [101] yönelimi) saçılma deseni (2x4) tekrar oluşmuş (100) GaAs yüzeyinden elde edilen desen [9].   | 34 |
| Şekil 3.7  | a) Örnek yüzeye ulaşan bir atom veya molekülün örnek yüzeye etkileşme potansiyeli. b) MDE'de örnek yüzeyinde oluşan önemli durumlar [9].  | 36 |
| Şekil 3.8  | Gazi Üniversitesi STARLAB'da büyütülmesi amaçlanan AlGaAs/GaAs yapısı. Kod ismi GS0008'dir.   | 41 |
| Şekil 3.9  | Fotoluminesans aygıtının ana hatları.   | 42 |
| Şekil 3.10 | Şekil sırasıyla ( $D^0, h$ ) Vericilerden değerlik banda geçişleri, ( $e, A^0$ ) iletkenlik bandından alıcılara, ( $D^0, A^0$ ) vericilerden alıcılara, ( $e, h$ ) banttan banda, (FE) ve (BE) serbestlik ve geçiş ışınimsal geçişlerini gösteriyor. Bunlar yarıiletkenlerde görülen fotoluminesans geçişlerdir [17]. | 43 |
| Şekil 3.11 | Şekil tipik bir düşük enerjili FL grafiğini gösteriyor. Burada (1) banttan alıcıya ( $e, A^0$ ), (2) ve (3) eksiton bağları (BE), (4) ve (5) serbest eksitonlar ve (6) kuantum kuyusundaki ilk elektron durumundan ilk ağır deşik durumuna geçişi gösteriyor [17].  | 43 |

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Şekil 3.12 | Elipsometrinin ana hatları. Işık kaynağından gelen ışık önce polarizleniyor daha sonra örnekle belirli açılarda temas geçtikten sonra analizöre gidiyor.   | 45 |
| Şekil 3.13 | Elipsometri ve modelin grafik eşleşmesi,(a) kötü eşleşme, (b) iyi bir eşleşme [19].  | 46 |
| Şeki 4.1   | Kod ismi GS0008 olan yarıiletken yapının amaçlanan yapı grafiği.   | 47 |
| Şekil 4.2  | GS0008 yapısının 16 K ve 298 K'deki sıcaklıklarda elde edilmiş fotoluminesans sonuçları.   | 48 |
| Şekil 4.3  | GS0008 yapısının fotoluminesans sonucuna göre kuantum kuyusunun grafik gösterimi. (a) 298K'de alınan sonuca göre, (b) 16K'de alınan sonuca göre çizilen şekildir.  | 50 |
| Şekil 4.4  | 950 nm dalga boyunda 70 ile 80 derece arasında 10'ar dereceyle değişen açılardan elde edilen verilerin grafiği. Alttan elde edilen $\Psi$ , $\Delta$ grafiği deneysel ve model grafiğin biri birine göre durumu. | 52 |
| Şekil 4.5  | Elipsometri ölçümünde elde ettiğimiz sonuçlara göre oluşan yapı.   | 53 |
| Şekil 4.6  | Elipsometri ölçümünde elde ettiğimiz sonuçlara göre oluşan model yapı.   | 54 |
| Şekil 4.7  | $\Delta$ parametresine göre model grafik ile deneysel grafiğin biri birine göre durumu.  | 55 |

- Şekil 4.8  $\Psi$  parametresine göre model ve deneysel grafiğin biri birine göre durumu. 55
- Şekil 4.9 (a) amaçlanan yapı (b) bilgisayar ortamında elde edilen model. 56



## ÖNSÖZ

Bu çalışmada benden yardımlarını esirgemeyen danışmanlarım Yrd. Doç. Dr. Orhan ZEYBEK ve Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e teşekkür ediyorum.

Gazi üniversitesi bünyesinde kurulan STARLAB Türkiye'de Moleküler Demet Epitaksi tekniğiyle kuantum kuyulu yapıların üretildiği ilk yerdir. STARLAB yarıiletkenler ile ilgili ileri düzeyde araştırma yapılabilecek donanıma sahip bir laboratuardır. Bana bu laboratuarda çalışma olanağı sunan Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK 'e tekrar çok teşekkür ediyorum.

MDE laboratuvarında bana öğrettikleri için Prof. Dr. Tofiq MAMMADOV'a, elipsometri ve fotoluminesans aygıtlarının kullanımında ve sonuçların alınmasında benden yardımlarını esirgemeyen Dr. Barış AKAOĞLUNA teşekkür ediyorum. Ayrıca gerektiğinde sorularımı cevaplayan Doç. Dr. Ali TEKE'ye teşekkür ediyorum.

Yarıiletkenler elektronik teknolojisinin temelidir. Bu tezde onlar hakkında bilgi vermeye çalıştım. Ülkece teknolojiye önem vermeliyiz. Çünkü ekonomik refah ve güç teknolojiden geçer.

Ve tabiki benden maddi ve manevi yardımını esirgemeyen sevgili aileme teşekkür ediyorum

## 1. GİRİŞ

Çağımızın sahip olduğu teknolojide kullanılan elektronik cihazların temel aygıtları diyotlar, transistörler ve mikro işlemcilerdir. Bu bahsettiğimiz aygıtların temelinde yarıiletkenler vardır. Bundan da anlaşılacağı gibi yarıiletkenler hayati önem taşımaktadır. Dünyayı teknoloji açısından takip etme ve bu piyasada söz sahibi olmanın önemli unsurlarından biri yarıiletkenler teknolojisinde gelişmiş teknolojilere sahip olmaktır.

Bu tezde konu edilen çalışma AlGaAs/GaAs kuantum kuyulu yarıiletken yapısıdır. Bu yapı büyütülürken Moleküler Demet Epitaksi (MDE) (Molecular Beam Epitaxy (MBE)) tekniği kullanıldı. MDE yüksek saflıktaki yarıiletken yapıları üretebilen yüksek vakum tabanlı bir sistemdir. Bizim kullandığımız sistem VG80H modelidir. Bu sistem Gazi Üniversitesi'nde bulunan STARLAB'da bulunmaktadır. Burada büyütülen kuantum kuyulu yapılar Türkiye'de bu teknikte üretilmiş ilk örneklerdir.

Bu tezde incelenen yapının kod ismi GS0008'dir. Bu yapı 5 nm kalınlığında tekli kuantum kuyusuna sahiptir. Kuantum kuyuları doğanın bize sunduğu belirli bant aralıklarına mahkum olmadan bize gereken bant aralıklarına sahip yapıları üretmemizi sağlar [1].

Bu çalışmada  $Al_{0.6}Ga_{0.4}As/GaAs$  tekli kuantum kuyusuna sahip örneğin optiksel ve yapısal özellikleri incelenmiştir. Optiksel incelemede fotoluminesans tekniği, yapısal incelemede ise elipsometri tekniği kullanılmıştır.

İkinci bölümde yarıiletkenler ve düşük boyutlu yarıiletkenler hakkında genel bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde MDE tekniği, bu tekniğin çalışmaya prensibi ve yarıiletken yapının üretimi ile ilgili yöntemler anlatılmıştır. Dördüncü bölümde deneysel sonuçlar incelenmiştir. Sonuç bölümünde elde ettiğimiz deneysel sonuçlar tartışılmıştır.

## 2. YARIİLETKENLER VE DÜŞÜK BOYUTLU YARIİLETKENLER

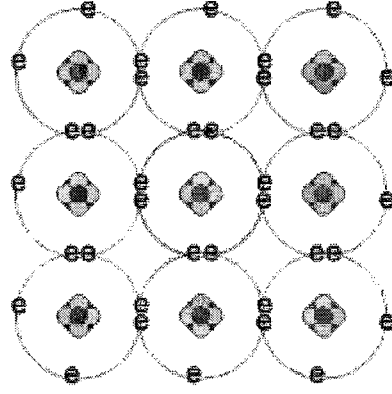
### 2.1 Yarıiletkenler

Safsızlık veya örgü kusuru içermeyen mükemmel bir yarıiletken kristal saf yarıiletken olarak adlandırılır. Buna bağlı olarak, bir malzemede mutlak sıfır sıcaklığında yük taşıyıcıları yoktur, fakat sıcaklık yükseldikçe elektron-deşik çiftleri oluşur. Taşıyıcılar çift olarak üretildiklerinden iletkenlik bandındaki elektronların  $n$  yoğunluğu değerlik bandındaki deşiklerin  $p$  yoğunluğuna eşit olur. Böylece

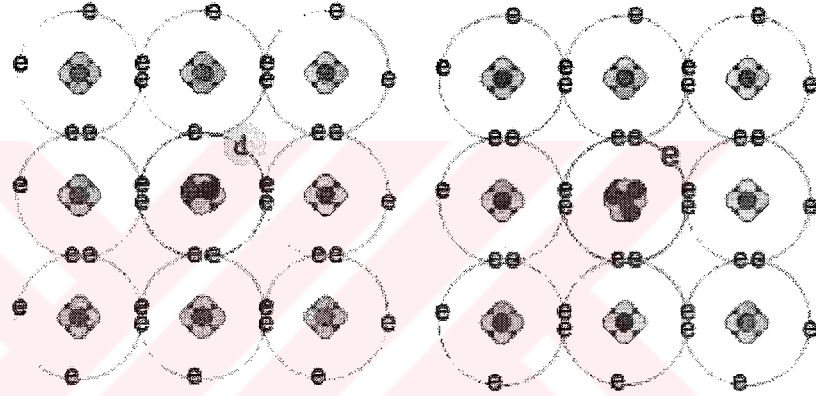
$$n = p = n_i \quad (2.1)$$

ifadesine sahip oluruz. Burada  $n_i$  saf taşıyıcı yoğunluğudur.  $n_i$ 'nin değeri sıcaklıkla üstel olarak değişmesine rağmen oda sıcaklığında bile genelde çok büyük değerlere sahip değildir.

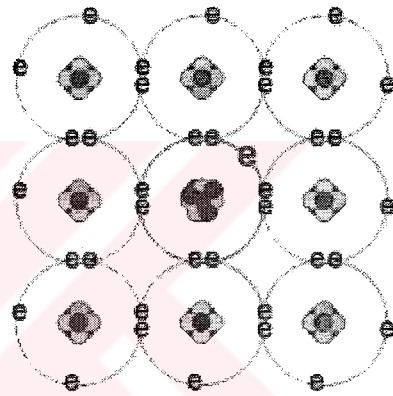
Bir yarıiletkendeki yük taşıyıcılarının sayısı uygun safsızlıkların kristal örgüsü içinde oluşturulmasıyla artırılabilir. Bu işleme katkıma denir. Bu işlemde bir kristal değiştirilebilir ve böylece kristalin ya elektron yada deşik açısından baskın olması sağlanabilir. Bunun sunucu olarak şekil 2.1'de görüldüğü gibi kristal ya  $n$ -tipi (çoğunluk taşıyıcılarının negatif elektronlar ve azınlık taşıyıcılarının deşikler olduğu) veya  $p$ -tipi (çoğunluk taşıyıcıları pozitif deşikler azınlık taşıyıcıların negatif elektronların olduğu) yapılabilir. Böylece, katkılanmış yarıiletkenlerde taşıyıcı yoğunlukları eşit olmayacak ve malzeme saf olmayan olarak adlandırılacaktır [2]. Örneğin AlGaAs ve GaAs yapılarında yapıyı  $p$ -tipi yapmak için yapı içerisine Be atomu,  $n$ -tipi yapmak için Si atomu eklenir.



(a)



(b)



(c)

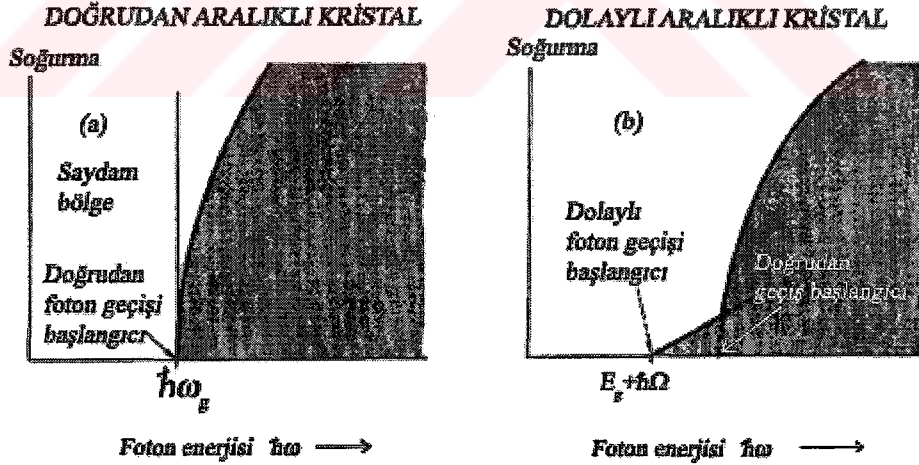
Şekil 2.1: Bir yarıiletkendeki katkıma: (a) saf yarıiletken; burada elektron ve deşik miktarı biri birine eşittir. (b) p-tipi yarıiletken; burada deşik sayısı elektron sayısından fazladır. (c) n-tipi bir yarıiletken; burada elektron sayısı deşik sayısından fazladır.

Özgün iletkenlik ve özgün taşıyıcı yoğunluğu, bant aralığının sıcaklığa oranı olan  $E_g / k_B T$  parametresiyle belirlenir. Bu oran büyükse özgün taşıyıcı yoğunluğu az olacaktır. Enerji bant aralığı ölçümlerinde en yaygın olarak kullanılan yöntem optik soğurmadır. Sürekli optik soğurma bölgesinin eşik frekansı  $\omega_g$  ise bant aralığı  $E_g = \hbar\omega_g$  ile tayin edilir (Şek. 2.2a ve 2.3a). Doğrudan soğurma olayında bir foton kristal tarafından soğurulurken bir elektron ve bir deşik oluşur.

Dolaylı soğurma olayındaki (Şek. 2.2b ve 2.3b) minimum enerji aralığı hesabı, aralarında büyük bir  $\vec{k}_c$  dalga vektörü farkı olan elektron ve deşik durumlarını içerir. Burada minimum enerji aralığında doğrudan bir foton geçişi, dalga vektörü korunumu koşuluyla sağlanamaz, çünkü bu enerji aralığında foton momentumu çok küçüktür. Ancak, bu olayda dalga vektörü  $\vec{K}$  ve frekansı  $\Omega$  olan bir fonon oluşmuşsa, korunum yasalarına göre

$$\vec{k}(\text{foton}) = \vec{k}_c + \vec{K} \approx 0 \quad \hbar\omega = E_g + \hbar\Omega \quad (2.2)$$

olmak zorundadır. Fonon enerjisi  $\hbar\Omega$  genellikle  $E_g$  bant aralığından çok küçük olacaktır. Burada çok büyük dalga vektörlü bir fonon bile kristal momentumu kaynağı olabilir, çünkü buna karşılık gelen enerjiler ( $\sim 0.01$  ile  $0.03$  eV olup) enerji aralığına kıyasla küçüktür. Sıcaklık yeterince yüksekse, gerekli fonon kristalin ısısal çalkantısı ile zaten uyarılmış olur. Ayrıca, foton soğurulması ile beraber aynı anda bir de fonon soğurulabilir.

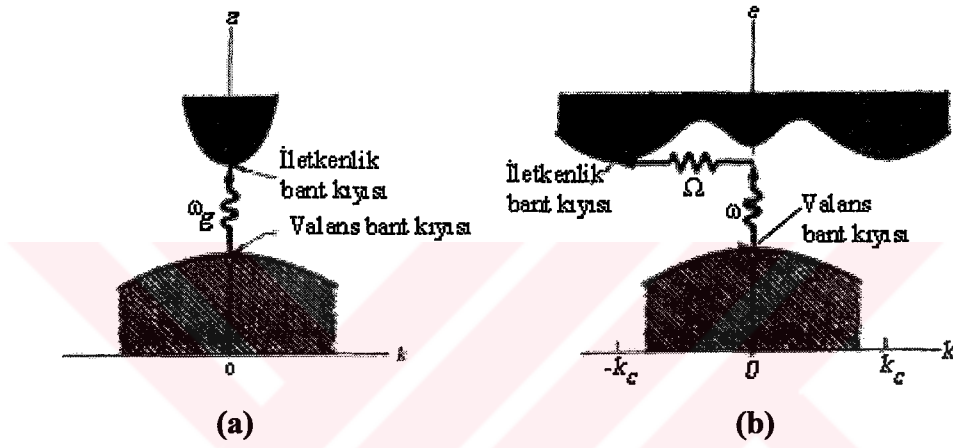


Şekil 2.2: Saf yalıtkanlarda mutlak sıfırda optik soğurma [3].

Eğer, şekil 2.2'ye bakılırsa saf yalıtkanlarda mutlak sıfırda optik soğurmayı görebiliriz. Şekil 2.2a'daki durumda enerji aralığı eşik enerjisiyle  $E_g = \hbar\omega_g$  olarak belirlenir, Şekil 2.2b'deki durumda eşik enerjisi yakınında optik soğurma daha zayıf



olur. Burada  $\hbar\omega = E_g + \hbar\Omega$  değerinde bir foton soğurulduğunda üç parçacık oluşur bunlar serbest bir elektron, serbest bir deşik ve  $\hbar\Omega$  enerjili bir fonondur. Şekil 2.2b'deki  $E_{dik}$  enerjisi, fonon olmadan serbest bir elektron ve serbest bir deşik oluşturulması için eşik enerjisidir. Bu tür geçişlere "dikey" denir ve bu şekil 2.2a'daki doğrudan geçişe benzer. Bu diyagramlarda, bazen eşğin alt tarafına yakın bölgede yer alan soğurulma geçişleri gösterilmemiştir. Bu geçişler "eksiton" denilen bağlı elektron-deşik çifti oluşmasından kaynaklanır.



Şekil 2.3: Eşikteki geçişler: (a) doğrudan geçişi gösteriyor. (b) dolaylı geçişi gösteriyor [3].

Şekil 2.3a'da görüldüğü gibi iletkenlik bandının en alt noktası ile değerlik bandının en yüksek noktası aynı  $\vec{k}$  değerine sahiptir. Doğrudan bir optik geçiş (dikey çizili)  $\vec{k}$  değerinde önemli bir değişikliğe yol açmaz, çünkü soğurulan fotonun dalga vektörü küçüktür. Doğrudan geçişli soğurulmada eşik frekansı  $\omega_g$  enerji aralığını  $E_g = \hbar\omega_g$  ile belirler, şekil 2.3b'dede görüldüğü gibi dolaylı geçiş hem foton ve hem de fonon içerir. Çünkü  $\vec{k}$  uzayında değerlik ve iletkenlik bantları arasında geniş bir aralık vardır, şekil 2.3b'deki dolaylı geçişin eşik enerjisi gerçek bant aralığından daha büyük olur. Bant kıyıları arasındaki soğurulma için eşik enerjisi  $\hbar\omega = E_g + \hbar\Omega$  olup,  $\Omega$  frekansı  $\vec{K} \approx -\vec{k}_c$  dalga vektörlü fononun frekansıdır. Öte yandan, yüksek sıcaklıklarda, ortamda zaten var olan fononlar bir fotonla birlikte soğurulabilirler ve bu geçişin eşik enerjisi  $\hbar\omega = E_g - \hbar\Omega$  olur

Genelde, iki bandın tüm noktaları arasında geçişler olabilir ve bu geçişler sırasında dalga vektörü ve enerji korunur [3].

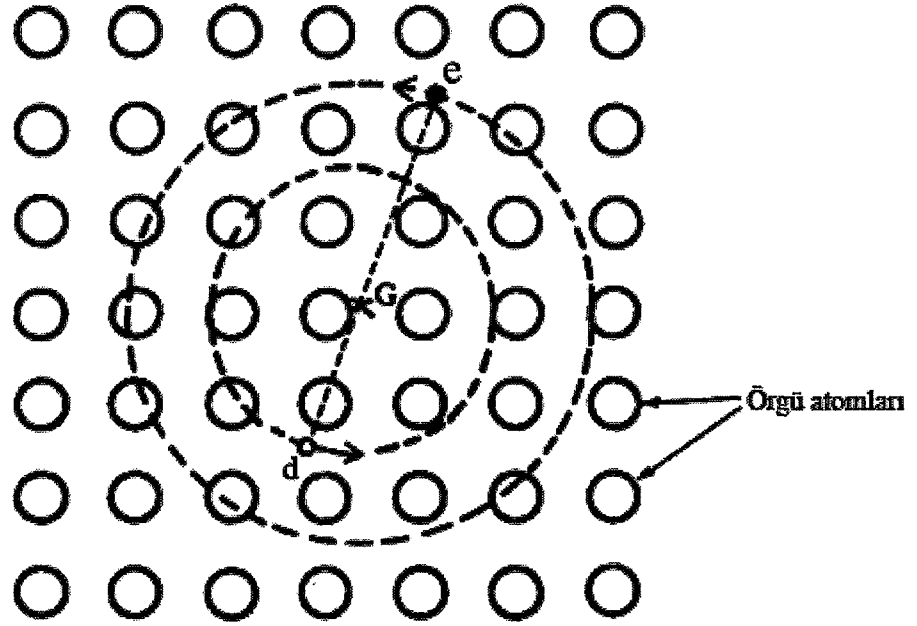
Uygun safsızlıkların saf yarıiletken maddelere konulmasının iletkenlik bandının hemen altında yerleşmiş elektron enerji seviyelerinin oluşmasına yol açar. Bununla birlikte benzer şekilde yerleşmiş elektron enerji seviyeleri saf malzemelerde de gözükabilir. Bunun sebebi bir deşik ile bir elektronun Coulomb çekim kuvveti ile birbirine bağlanmasıdır. Bağlı elektron-deşik çifti *eksiton* olarak isimlendirilir. Eksitonu, şekil 2.4'te gösterildiği gibi, etkin kütlelerinin tersiyle orantılı yörünge yarıçaplı ortak çekim merkezi etrafında dönen bir elektron ve deşik olarak ele alabiliriz. Elektron ve deşikin indirgenmiş kütlesi olan  $m_r^*$  ile, elektron kütlelerinin yer değiştirmesi şartıyla Bohr modeli bu duruma uyarlanabilir:

$$\frac{1}{m_r^*} = \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \quad (2.3)$$

ile verilir. Eksitonun  $E_e$  bağlanma enerjisi (2.4) eşitliğinin düzenlenmesi ile elde edilebilir:

$$E_e = 13.6 \frac{m_r^*}{m_e} \left( \frac{1}{\epsilon_r} \right)^2 eV \quad (2.4)$$

$m_r^*$ 'in büyüklüğü  $m_e^*$  ve  $m_h^*$ 'in mertebesinde olduğundan eksiton enerji seviyelerinin katkılanmış yarıiletkenlerdeki verici seviyelerindeki gibi yerleşmelerini bekleriz.



Şekil 2.4: Eksitonun şekillendirilmesi. Elektronun (e) ve deşiğin (d) coulomb kuvvetiyle birbirlerine bağlandıkları ve etkin kütlelerinin tersiyle orantılı yarıçapa sahip G ortak yerçekimi merkezi civarında döndükleri varsayılabilir ( $m_h^* > m_e^*$  alınmıştır) [2].

Eksitonlar kristal içerisinde örgü boyunca ilerleyebilirler. Bu özelliği sayesinde yapı içerisinde bir noktadan başka bir noktaya enerji transferini sağlayabilirler. Bundan dolayı eksitonlar yapı içerisinde enerji aktarımı açısından oldukça önemlidirler. Katıların lüminesansında Eksitonlar önemli bir rol oynarlar.

Yarıiletkenin özelliklerinin saptanması ve aygıt davranışının incelenmesinde taşıyıcı yoğunluğunun bilinmesi önemlidir. Taşıyıcı yoğunlukları hesaplanırken bir potansiyel kuyusundaki enerji seviyelerini veren (2.5) eşitliğinden türetilen durum yoğunluğu fonksiyonu olan  $Z(E)$  ile saptanabilir. Burada  $E$  bandın dibine göre ölçülür.

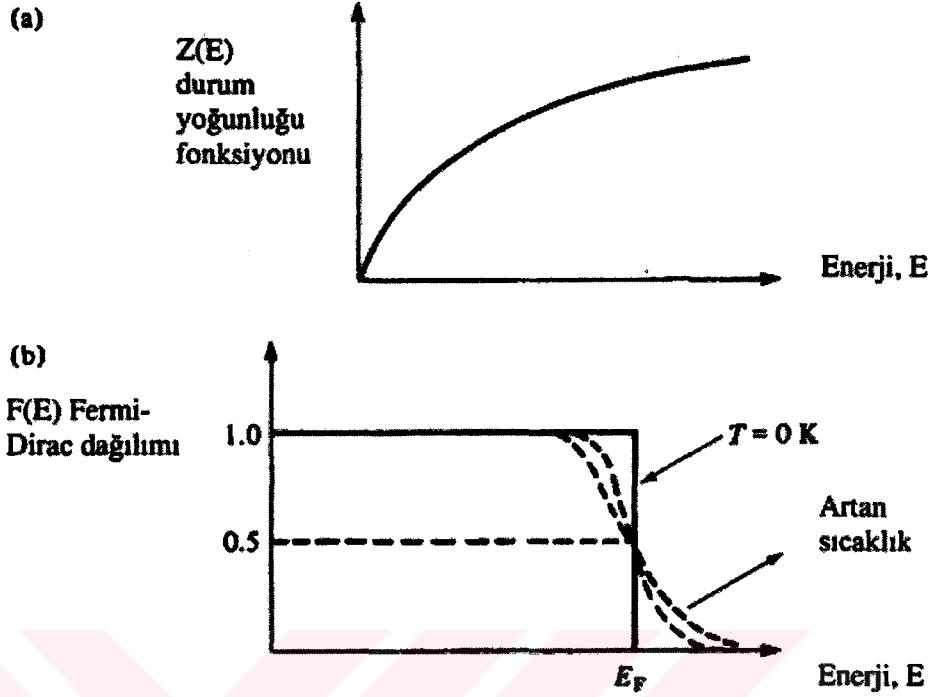
$$E_n = \frac{n^2 h^2}{8mL^2} \quad (2.5)$$

$$Z(E) = \frac{4\pi}{h^3} (2m_e^*)^{3/2} E^{1/2} \quad (2.6)$$

Durum yoğunluğu ile ilgili diğer parametre Pauli ilkesine dayanır. Burada T sıcaklığında işgal edilme olasılığı olan özel bir enerji seviyesi Fermi-Dirac istatistiği ile verilir. Bu Maxwell-Boltzmann dağılım fonksiyonunun işlerlik kazandığı bir ideal gazdaki atomların durumuna zıttır (Gerçekte bir çok durumda elektron Maxwell-Boltzmann istatistiği ile yaklaşık olarak ifade edilebilir. Bu, işlemleri basitleştirmek içindir). Hesaplamalar sonucunda Fermi-Dirac dağılım fonksiyonunun

$$F(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1} \quad (2.7)$$

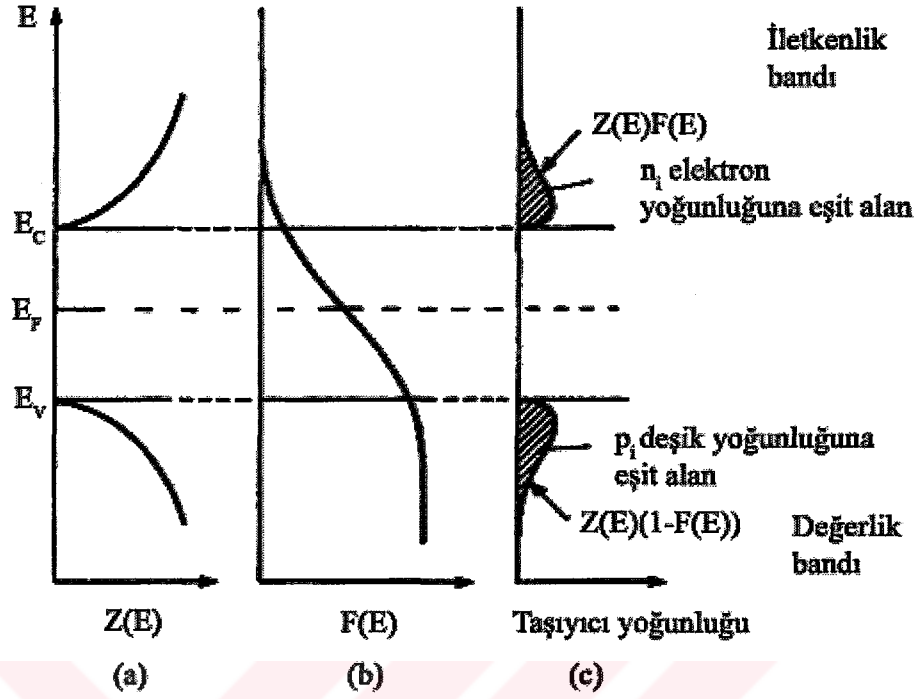
olduğu bulunmuştur. Burada  $E_F$  Fermi enerjisi olarak isimlendirilen karakteristik bir enerjidir. Dağılım fonksiyonu şekil 2.5b'de gösterilmiştir. 0 K'de  $F(E)$ 'nin  $E_F$ 'den küçük enerjiler için 1,  $E_F$ 'den büyük enerjiler için 0 olduğuna dikkat edilmelidir. Mutlak sıfırın üzerindeki herhangi bir sıcaklıkta  $E = E_F$  'deki enerji seviyesinin doldurulma ihtimali (2.7) eşitliğinden de bulunabileceği gibi 0.5'tir. Şekil 2.5b  $E_F$ 'nin üstündeki hallerin doldurulma ihtimalinin  $T > 0$  için sonlu ve buna karşılık  $E_F$ 'nin altındaki hallerin boş olma ihtimalinin var olduğunu gösterir. Gerçekte  $F(E)$ ,  $E_F$  civarında simetriktir. Bu simetri sayesinde Fermi seviyesi elektron ve deşiklerinin yoğunluklarının hesaplanmasında bir referans noktası olur. Saf yarıiletkenlerde olasılık dağılımını gösteren uzantılar şekil 2.6b'de gösterildiği gibi sırayla iletkenlik ve değerlik bantlarına uzanırlar. Durum yoğunluğu fonksiyonu ve taşıyıcı yoğunluklarının grafiği şekil 2.6a ve şekil 2.6c'de gösterilmiştir. Saf yarıiletkenlerde elektron ve deşik yoğunlukları eşit olduklarından, Fermi seviyesinin enerji aralığının ortasında olmasını bekleriz.



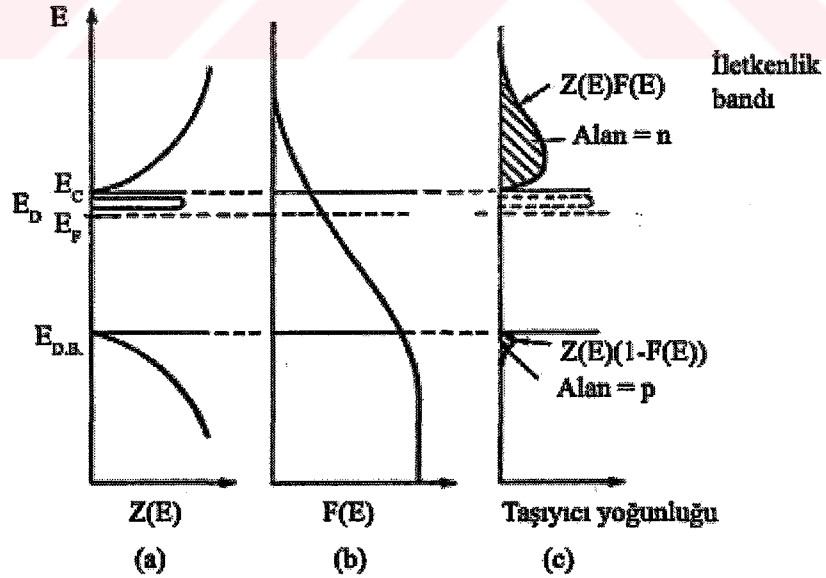
Şekil 2.5: (a) Durum yoğunluğu fonksiyonu ve (b)  $T=0$  K ve  $T>0$  K'de Fermi-Dirac fonksiyonu [2].

n-tipi yarıiletkende iletkenlik bandındaki elektronların sayısı değerlik bandındaki boşlukların sayısından oldukça fazladır. Bunun sonucu olarak Fermi seviyesinin verici seviyelerine daha yakın olmasını gerekir. Buna benzer olarak p-tipi yapıda Fermi seviyesinin alıcı seviyelerine daha yakın olması gerekir. n-tipi bir yapı için Fermi seviyesi, durum yoğunluğu ve taşıyıcı yoğunlukları şekil 2.7'de gösterilmiştir. Çoğu zaman, örneğin farklı tipteki yarıiletkenler arasında yapılan eklemlerde, safsızlık seviyelerinin enerjileri Fermi seviyesinin nerede olduğunun bilinmesi durumunda ihmal edilebilir [4].

Taşıyıcı yoğunluklarının hesabına devam edersek, durum yoğunluklarının çarpımının ilgililenen enerji aralığı boyunca doldurma ihtimali ile toplamı şeklinde verileceğini görebiliriz.



Şekil 2.6: (a) Durum yoğunluğu, (b) Fermi-Dirac dağılımı ve (c) taşıyıcı yoğunluklarının saf bir yarıiletken için grafik gösterimi [4].



Şekil 2.7: (a) n-tipi yarıiletken için durum yoğunluğu, (b) Fermi-Dirac dağılımı ve (c) taşıyıcı yoğunluklarının grafiğini gösteriyor [4].

Böylece,

$$n = \int_{\text{Enerji bandı}} F(E)Z(E)dE \quad (2.8)$$

olur.  $F(E) = 1$  olan mutlak sıfırdaki bir metal durumunda üst dolu seviye  $E_F$ 'dir.

Buna bağlı olarak

$$n = \int_0^{E_F} \frac{4\pi}{h^3} (2m_e^*)^{3/2} E^{1/2} dE \quad (2.9)$$

ifadesine ve buradan da

$$n = \frac{8\pi}{3h^3} (2m_e^* E_F)^{3/2} \quad (2.10)$$

elde ederiz. Aslında sıkça  $n$ 'yi daha önce tanımlandığı gibi hesaplarız ve  $E_F$ 'yi bulmak için (2.10) eşitliğini kullanırız; bakır ve alüminyum için tipik değerler sırasıyla 7.0 eV ve 11.2 eV'tur. Bakır ve alüminyum için verilen bu değerler deneysel değerlerle oldukça uyuşmaktadır.

Bir yarı iletkendeki iletim bandındaki elektron yoğunlu göz önüne alınırsa.

$$n = \frac{4\pi}{h^3} (2m_e^*)^{3/2} \int_{E_c}^{E_T} \frac{(E - E_c)^{1/2}}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1} dE \quad (2.11)$$

olur. Burada  $E_T$  bandın üst noktasıdır. Gerekli hesaplamalar yapıldığında

$$n = N_c \exp\left[-\left(\frac{E_c - E_F}{kT}\right)\right] \quad (2.12)$$

bulunur. Burada

$$N_c = 2 \left( \frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (2.13)$$

dir.  $N_c$  iletkenlik bandındaki etkin durum yoğunluğu olarak bilinir; değeri sabit sıcaklıkta sabittir.

Benzer şekilde, değerlik bandındaki deşik yoğunluğu

$$p = \int_{\text{Değ. bandı}} (1 - F(E)) Z(E) dE \quad (2.14)$$

veya

$$p = N_v \exp(E_F - E_v / kT) \quad (2.15)$$

ile bulunabilir. Burada

$$N_v = 2 \left( \frac{2\pi m_h^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (2.16)$$

dir. (2.12) ve (2.15) hesaplanabilen taşıyıcı yoğunlukları uygun Fermi seviyesinin kullanılması sağlama alınırsa herhangi bir yarıiletken için geçerli olacaktır. Bu eşitlikleri  $n = p = n_i$  olan saf bir yarıiletkende  $E_F$  için bir ifade türetmede kullanabiliriz ve

$$E_{Fi} = \frac{1}{2} E_g + \frac{3}{4} kT \ln \left( \frac{m_h^*}{m_e^*} \right) \quad (2.17)$$



dir. (2.17)'in sağ tarafındaki ikinci terim genelde küçüktür ve yukarıda varsaydığımız gibi  $E_{Fi} \cong \frac{1}{2} E_g$  'dir.

Tekrar (2.12) ve (2.15) eşitliklerinden  $n$  ve  $p$ 'nin çarpımının sabit sıcaklıkta tutulan yarıiletkenin verilen bir parçası için sabit olacağına dikkat etmeliyiz. Yani

$$np = n_i p_i = n_i^2 = N_c N_v \exp(-E_g / kT) \quad (2.18)$$

dir.  $n$  ve  $p$ 'nin bir tanesinin bilinmesi durumunda diğerinin  $n_i^2$ 'den tespit edilebilmesi sebebiyle (2.18) eşitliği oldukça önemlidir. Bu eşitlik genelde yarıiletkenler için '*kütle eylemi kanunu*' olarak bilinir.

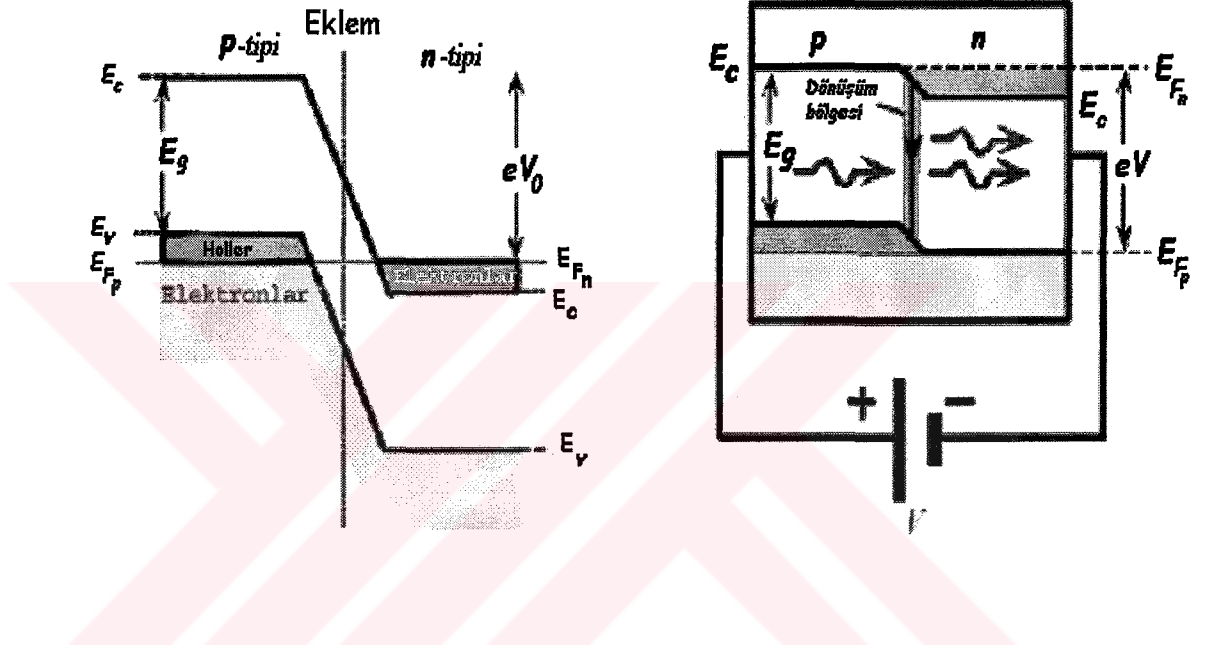
(2.18) eşitliği  $n_i$  'nin sıcaklık değişiminin temelde üstel olduğunu yani  $n \propto \exp(-E_g / 2kT)$  olduğunu gösterir. Benzer olarak bir  $n$ -tipi yarıiletken için verici seviyelerinden elektronları iletkenlik bandına uyarma  $\exp(-E_D / kT)$  üstel fonksiyonuyla belirlenir edilir.  $E_D$  nispeten küçük olduğundan, 100 K civarındaki sıcaklıkların üstünde bütün vericilerin iyonlaştıklarını ve böyle sıcaklıklarda saf uyarımayla oluşan elektron-deşik çiftleri sayısının ihmal edilebilir olduklarını buluruz [2, 4].

## 2.2 Düşük Boyutlu Yarıiletkenler

Moleküler Demet Epitaksi (MDE) ve Moleküler Organik Kimyasal Buhar Depozisyon (MOCVD) gibi epitaksiyel büyütme tekniklerinden yararlanarak, farklı bant aralığına sahip olan yarıiletkenlerin atomik tabakalar halinde birbiri ardına büyütülmesi ile elde edilen yapılar, düşük boyutlu ya da iki boyutlu olarak adlandırılmaktadır. Bu yapılar, yarıiletkenlerde elektron ve deşiklerin büyütme doğrultusunda kuantize olduğu ve diğer iki boyutta serbest olarak hareket edebildiği yapılardır [5].

Farklı tipteki yarıiletken yapıları biri birinin üzerine büyütürerek heteroeklemlı yapılar veya kuantum kuyulu yapılar üretilebilir. Kuantum kuyulu yapılar ile kuantum kuyusuna sahip olmayan heteroeklemlı yapılar arasında farklar vardır.

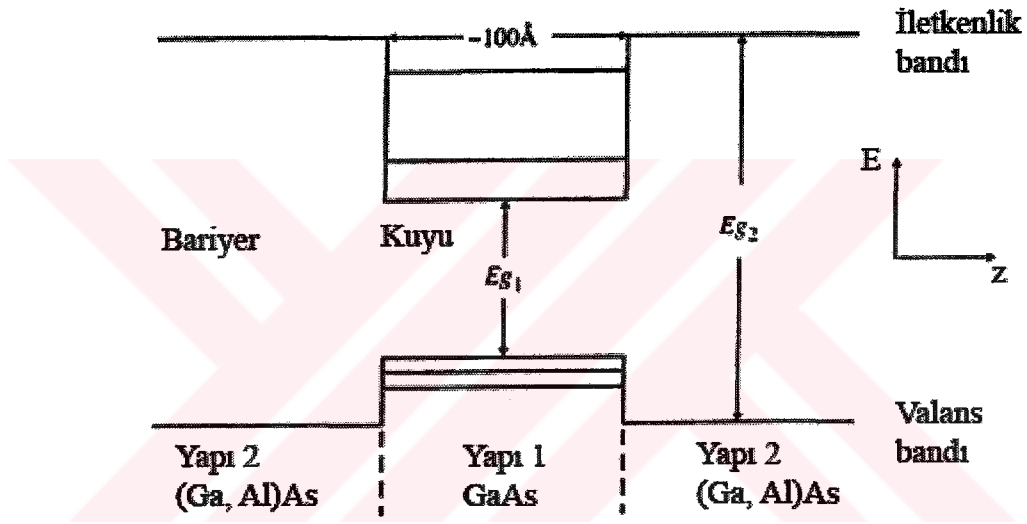
n-tipi AlGaAs ve p-tipi AlGaAs üçlü yarıiletkenleri bir birinin üzerine büyütülürse diyot oluşur. Bu yapı kuantum kuyusuna sahip değildir.



Şekil 2.8: Diyotun grafik gösterimi.

Şekil 2.8'de görüldüğü gibi p- ve n- tipi yarıiletkenler biri birinin üzerine büyütüldüğünde diyot oluşur. Diyot ileri beslendiğinde elektronların bulunduğu bölge ile deşiklerin bulunduğu bölge şekillenir. Güç kaynağından dolayı iletim bandındaki elektron sayısı artar ve aynı zamanda değerlik bandındaki deşiklerin sayısı artar bir süre sonra yoğunluk farkından dolayı elektronlar deşik tarafına geçer. Bunun sonucu olarak tekrar birleşme olur ve  $h\nu$  enerjili fotonlar oluşur. Bu fotonların enerjisi elektronların bulunduğu bölgenin enerjisi ile düştüğü bölgenin enerji farkı kadardır. Yani bu tip bir diyottan sadece onun izin verdiği enerjiye sahip fotonlar üretebiliriz. Bu durum kuantum kuyulu yapılara göre dezavantajdır. Yararlılığı yüksek olan yapılarda bant aralığının kontrolü arzu edilen bir özelliktir.

(Al,Ga)As gibi GaAs'den daha geniş bant aralığına sahip bir materyal büyütülürse, bunun üzerine GaAs gibi daha dar bant aralığına sahip materyal büyütülürse ve bunun da üzerine daha geniş aralığa sahip olan (Al,Ga)As yapısı, büyütülürse en basit kuantum kuyulu yapı oluşur. Burada daha geniş aralıklara sahip yapılara bariyer, daha dar aralıklara sahip yapılara da kuyu denir. Şekil 2.9 oluşan iletim ve değerlik bandı kıyılarını gösteriyor, burada iletim bandı kıyısındaki ve değerlik bant kıyısındaki basamak yükseklikleri yapının içerdiği iki farklı yarıiletkenin özelliklerine bağlıdır.



Şekil 2.9: Basit bir heteroyapıda oluşan kuyu sistemi [6].

Daha dar aralıklı materyal iletim ve değerlik bandı içerisinde bir boyutlu kuyu olarak şekillenir. Bunun sonucu olarak  $z$  yönündeki büyümede elektron ve deşik seviyeleri kuyunun durumları ile sınırlıdır ve biz bunları alt bant olarak biliyoruz. Kuyu üç dizi alt bant içerir,

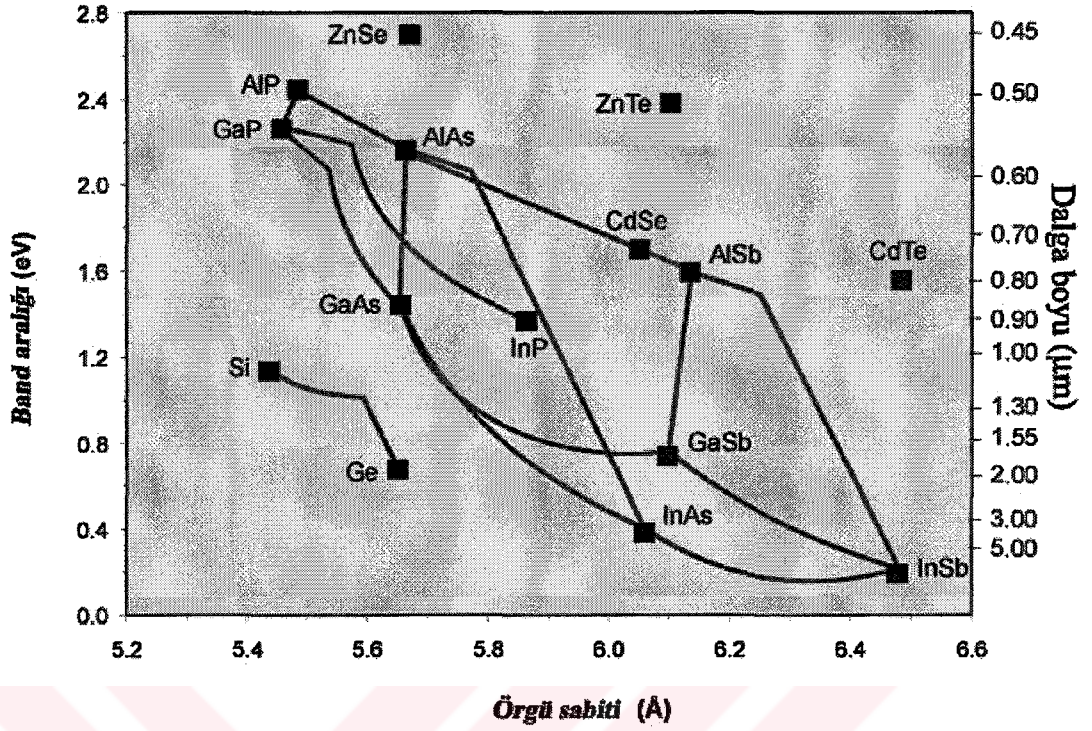
- Elektron alt bandı
- Hafif deşik alt bandı
- Ağır deşik alt bandı

her bir alt bant  $i = 1, 2, 3, \dots$  kuantum numaralarıyla isimlendirilmiş bir setin içindedir.  $xy$  düzlemindeki hareket sınırlandırılmamıştır; biz bu yüzden kuyuda iki boyutlu taşıyıcı sistemine sahibiz.

Biri birinin üzerine büyütülen yarıiletken tabakalarda en yaygın kullanılan materyaller AlAs ve GaAs materyalleridir. Peki neden bu materyaller daha fazla araştırılmış ve kullanılmıştır?

Yarıiletken yapı üretiminde tabakalar üst üste büyütülür ve biri birinin üzerine büyütülen materyallerin örgü sabiti ne kadar birbirine yakınsa okadar iyi yapılar üretilebilir ve tabaka kalınlığı sıkıntısı yaşanmaz. Önemli diğer bir sebep şudur ki AlAs ve GaAs yarıiletkenlerinin bant aralığı biri birinden farklıdır bu durum kuantum kuyulu yapılardaki kuyunun bant aralığını istediğimiz doğrultusunda kontrol etmemizi sağlar. Böylece yarıiletkendeki Al ve Ga oranları değiştirilerek bant aralığı artırılabilir veya azaltılabilir.

Şekil 2.9'da gösterilen AlGaAs/GaAs yapısındaki bant aralıkları  $Al_xGa_{1-x}As$  yarıiletkenindeki 0 ile 1 arasında değişebilen Al oranı olan  $x$  değeri ile değiştirilebilir.  $x$ 'in artması  $Al_xGa_{1-x}As$ 'ın bant aralığı olan  $E_g$ 'yi artırır, azalması azaltır.  $Al_xGa_{1-x}As$  yarıiletkeni, alüminyum oranı,  $x > 0.45$  olduğu durumlar için dolaylı geçişlerin olduğu aralığa,  $0 < x < 0.45$  aralığındaki değerler için ise doğrudan geçişlerin olduğu aralığa sahiptir. Şekil 2.10'a bakılırsa farklı yarı iletkenlerin örgü sabitlerinin ve bant aralıklarının birbirine göre durumu görülebilir. AlAs ve GaAs yarıiletkenlerinin örgü sabitleri şekil 2.10'da görüldüğü gibi biri birine diğer yarıiletkenlere göre oldukça yakındır. Şekil 2.10, AlAs'nin bant aralığı GaAs'den fazla olduğunu da gösteriyor. Şekil 2.10 incelenirse hem örgü sabiti uyumu hem de istenen bant aralığı farkı açısından biri birine göre uyumu yüksek olan yarıiletkenlerin AlAs ve GaAs olduğu görülebilir. Bu özellikleri sayesinde bu yarıiletkenler büyütmelerde sıkça kullanılmıştır [6].



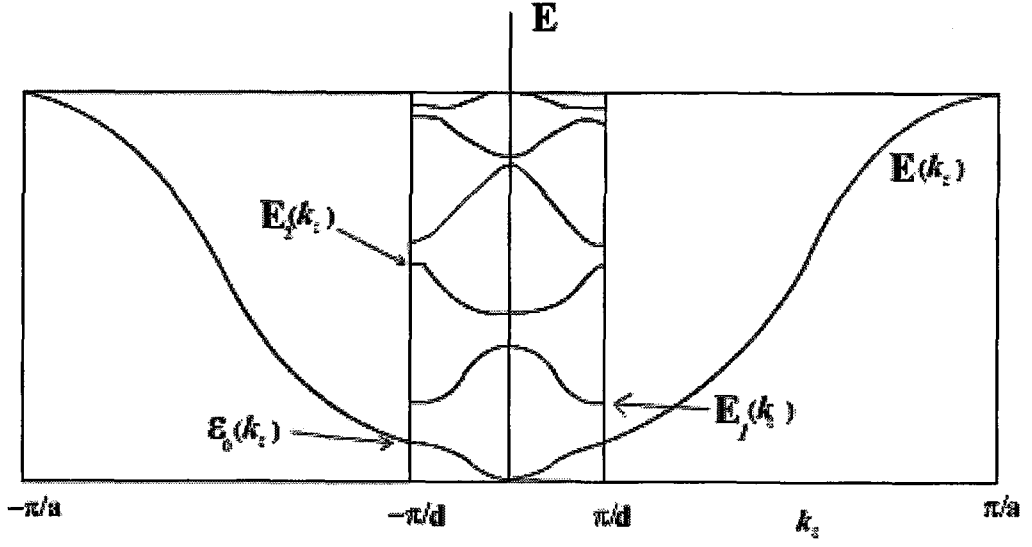
Şekil 2.10: Önemli yarıiletkenlerin biri birine göre durumu [7].

AlGaAs/GaAs tek kuyulu yarıiletken yapısında GaAs tabakasındaki elektronların hareketleri, sonlu bir kuantum kuyusunda sınırlanmıştır. İletkenlik bandının kenarları elektronlar için, değerlik bandının kenarları da deşikler için bir potansiyel kuyusu oluşturur. GaAs'ın bant aralığı  $Al_xGa_{1-x}As$ 'ın bant aralığından daha küçüktür. Bu nedenle, GaAs bir kuantum kuyusu gibi davranır ve  $Al_xGa_{1-x}As$  elektron ve deşiklerin her ikisi için de bir potansiyel engeli oluşturur. GaAs ve  $Al_xGa_{1-x}As$  yarıiletkenlerinin bant yapılarındaki bu farklılıktan dolayı, sistemin bant diyagramında, iletkenlik ve değerlik bandı kenarları arasındaki geçiş bölgesinde basamak şeklinde süreksizlikler oluşmaktadır. Bu basamakların yükseklikleri "iletkenlik bandı süreksizliği"  $DE_c$  ve "değerlik bandı süreksizliği"  $DE_v$  olarak adlandırılmaktadır.

Düşük boyutlu yarıiletken yapılar, büyütülen tabaka sayısına, kalınlığına ve büyütülen yapıların özelliklerine göre, tekli/çoklu kuantum kuyuları ya da süperörgüler olarak adlandırılırlar. Tekli kuantum kuyusu yapılarının ard arda

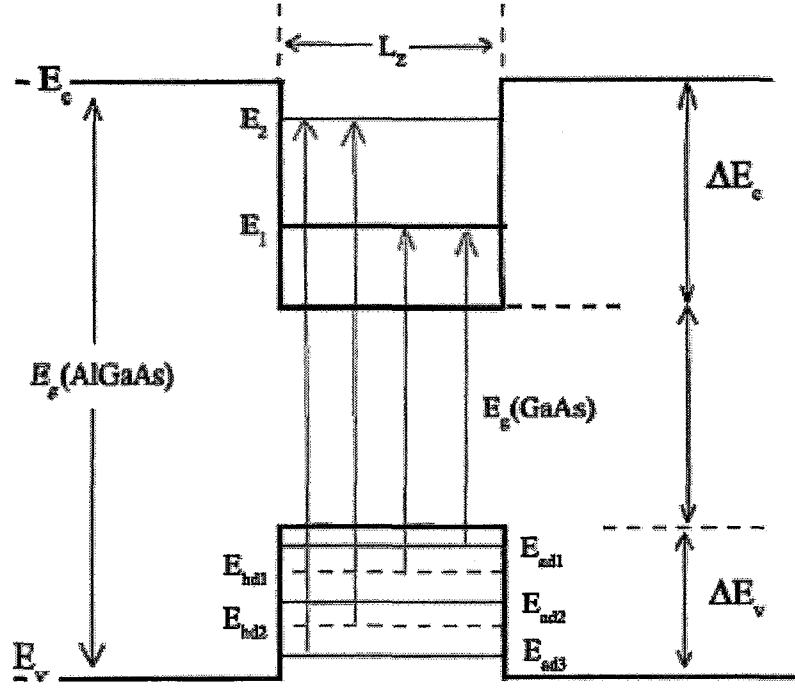






Şekil 2.12: Süperörgülerdeki miniband ve mini boşluklar. Burada  $\pi/a$  kristalin temelini oluşturan Brillouin- Bölge sınırlarını gösteriyor [6].

Kuantum kuyularındaki elektron ve deşiklerin enerji seviyeleri, Hamiltonyen yaklaşımıyla hesaplanabilmektedir.



Şekil 2.13: Bir  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As-GaAs-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  kuantum kuyusu yapısında oluşan süreksiz enerji seviyelerindeki,  $\Delta n = 0$  kuralına karşılık gelen izinli geçişler [8].

Şekil 2.13'de gösterilmiş olan kuantum kuyusu yapısı için, kuantum kuyusunun genişliği  $L_z$ 'nin, diğer boyutlardan ( $L_x$  ve  $L_y$ ) çok küçük olması nedeniyle, Hamiltonyen operatöründe şu yaklaşım yapılabilir:

$$H_{\text{toplam}} = H_{xy} + H_z \quad (2.19)$$

$H_{xy}$ , iki boyutlu elektron gazı için tek parçacık Hamiltonyeni ve  $H_z$  tek boyutlu sonlu potansiyel kuyusu için Hamiltonyendir. Burada asıl amaç, üç boyutlu sistemi, iki boyutlu sisteme tek boyutlu sistemi ekleyerek uygun olarak ayırmaktır.



İnce GaAs tabakasındaki bir elektron veya deşik enerjisi,  $H_{xy}$  ve  $H_z$  ile birleşmiş enerjilerin toplamı ile verilmektedir;

$$E(k_x, k_y, k_z) = \frac{\hbar^2 k_z^2}{2m_e^*} + \frac{\hbar^2 (k_x^2 + k_y^2)}{2m_e^*} \quad (2.20)$$

veya

$$E(k_x, k_y, n) = E_n + \frac{\hbar^2 (k_x^2 + k_y^2)}{2m_e^*} \quad (2.21)$$

dir. Burada  $E_n = \hbar^2 k_z^2 / 2m_e^*$  enerjisi, potansiyel kuyusundaki n. enerji seviyesine karşılık gelen elektron enerjisidir.  $m_e^*$  elektronun etkin kütesidir.  $\hbar$  Planck sabiti ve  $k_x$  ve  $k_y$  kristal momentumunun x ve y bileşenleridir. n. seviyeye karşılık gelen deşik enerjileri de,  $E_n = \hbar^2 k_z^2 / 2m_b^*$  ifadesi ile verilmektedir. Bu ifadedeki  $m_b^*$  deşğin etkin kütesidir.  $E_n$  enerjisinin n =1, 2, 3,... seviyelerine karşılık gelen değerleri elektronlar için  $E_1, E_2, E_3, \dots$  ile, ağır deşikler için  $E_{ad1}, E_{ad2}, E_{ad3}, \dots$  ile ve hafif deşikler için  $E_{hd1}, E_{hd2}, E_{hd3}, \dots$  ile gösterilmektedir.

Şekil 2.13'e bakarsak  $Ga_{1-x}Al_xAs$ -GaAs- $Ga_{1-x}Al_xAs$  yarıiletkenlerinden oluşmuş olan kuantum kuyusu içerisindeki elektron, ağır deşik ve hafif deşik enerji seviyeleri ve bu seviyeler arasındaki geçişler görülebilir. Burada yalnızca,  $\Delta n=0$  seçim kuralına karşılık gelen geçişler izinlidir.

Yasak enerji aralığından büyük olan  $\hbar\omega$  enerjisindeki bir ışığın,  $\Delta n=0$  seçim kuralına uygun olarak, bir elektronun, değerlik bandından iletkenlik bandına geçişini sağlayabilmesi için,

$$\hbar\omega = E_{g1} + E_n + H_n - E_n^{ex} \quad (2.22)$$

enerjisinde olması gerekmektedir. Bu ifadedeki,  $E_{g1}$  kuantum kuyularına karşılık gelen malzemenin (GaAs) yasak enerji aralığıdır.  $E_n$  ve  $H_n$  sırasıyla, elektron ve deşiklerin enerji seviyeleri ve  $E_n^{ex}$  elektron-deşik çiftinin yani eksitonun bağlanma enerjisidir. Bu bağlanma enerjisi, kuantum kuyusu genişliğine ve kuantum seviyelerine bağlı olarak değişmektedir. Kuyu genişliği arttıkça bağlanma enerjisi azalmaktadır.

Kuantum kuyuları ve süperörgülerde ise bağlanma enerjileri aynı zamanda bariyer genişliğine de bağlıdır. Yeterince dar bariyer genişliği durumlarında ( $L_B < 30\text{\AA}$ ), bağlanma enerjileri kuantum kuyusunu oluşturan ham malzemedeki değerine yaklaşmaktadır. Düşük boyutlu bir yapıda, eksitonların bağlanma enerjisi,

$$E_n^{ex} = \frac{\mu^* e^4}{2\varepsilon^2 \left(n - \frac{1}{2}\right)^2} \quad (2.23)$$

bağıntısıyla ifade edilmektedir. Burada,  $\mu^*$  indirgenmiş eksiton kütlesi,  $\varepsilon$  dielektrik sabiti ve  $e$  elektron yüküdür.  $n=0$  seviyesine karşılık gelen enerji,

$$E_0^{ex} = \left[ \frac{4(\mu^* / m_0)}{\varepsilon^2} \right] R \quad (2.24)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Burada  $R$ , Rydberg enerjisi ve  $m_0$  elektronun kütlesidir.  $\left[ (\mu^* / m_0) / \varepsilon^2 \right] R = R^*$  biçiminde yazılmaktadır. Bu durumda  $E_0^{ex} = 4R^*$  olur.  $R^*$  etkin Rydberg enerjisi olarak adlandırılmaktadır. Bu ifadeden, düşük boyutlu

yapıdaki bir eksitonun bağlanma enerjisinin, üç boyutlu yapıdaki eksitonun bağlanma enerjisinden dört kez daha büyük olduğu anlaşılmaktadır. Eksitonik davranış, oda sıcaklığında ham GaAs için gözlenemezken, kuantum kuyulu yapılarda oda sıcaklığında bile gözlenebilmektedir [8].

### 2.2.1 Kuantum Kuyularının Optiksel Özellikleri

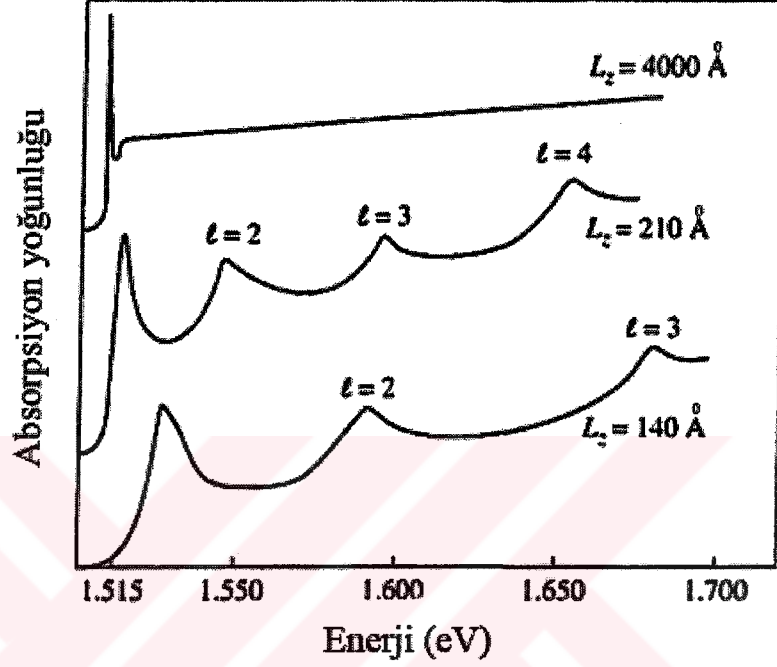
Bir kuantum kuyusunun bantlar arası optiksel soğurma veya emisyon, deşik ve elektron alt bantları arasındaki geçişlerden kaynaklanır. Seçme kuralları elektron ve deşik dalga fonksiyonları arasındaki örtüşmeyle belirlenir. Aynı kuantum numaralarının dalga fonksiyonları benzerdir ve buradaki geçişler kuvvetli olur. Kuantum numaraları farklı olanların dalga fonksiyonları zıt simetriye sahiptir dolayısıyla bunlar arasındaki geçiş zayıf olacaktır. Özetle geçiş kuralları,  $\Delta i = 0, 2$ : güçlü ve izinli geçişler,  $\Delta i = 1$  ise zayıf ve yasaklanmış geçişler olarak sıralana bilir.

Burada iki dizi deşik alt bandı olduğu için çiftler arasında kuvvetli geçişler olur. Bunlara örnek olarak ağır-deşik alt bandından elektron alt bandına geçiş ve hafif-deşik alt bandından elektron alt bandına geçişler gösterilebilir. Şekil 2.14, farklı genişliklerdeki kuantum kuyularının optiksel soğurmasını gösteriyor. Düşük kaliteli kuyularda geçişleri tek tek ayırt etmek zordur. Bunlara ek olarak

- geçiş enerjileri kuyu daralmaya başladığında artar, bu yükselmiş alt band sınırlama enerjisinden kaynaklanır;
- soğurma iki boyuttaki durumlarda elektron-deşik birleşme yoğunluğu adım adım artar,
- eksitonlar çok önemlidir çünkü kuyunun içindeki sınırlama elektron ve deşikleri ham halde bulunan yarıiletkenin daha yakın tutar buda eksitonların miktarını artırır.

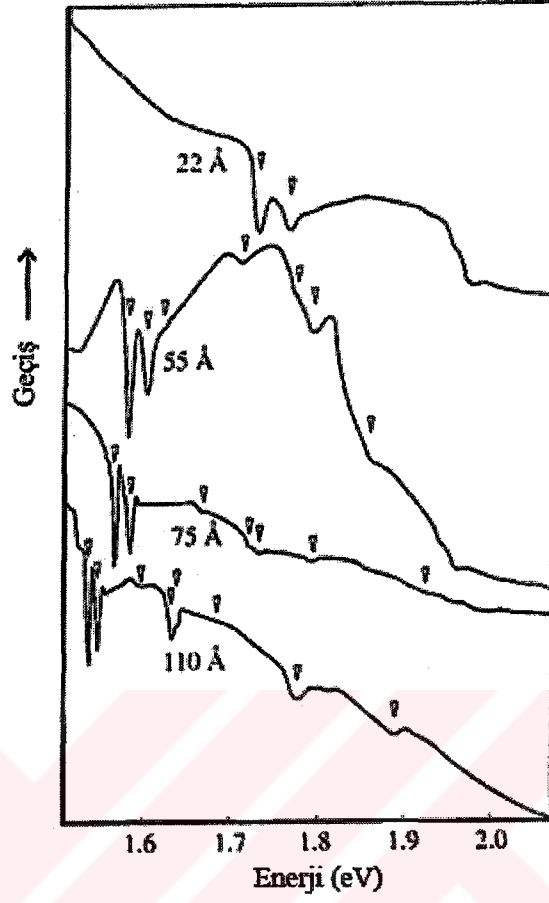
Şekil 2.15 çok daha kaliteli bir dizi GaAs-(GaAl)As kuantum kuyularının geçişlerini gösteriyor. Burada kullanılan algılayıcılar net bir cevap vermemiş yani

soğurmadaki adımlar çok açık görülemiyor buna karşın güçlü geçiş çiftleri görülebiliyor.



Şekil 2.14: 4.2 K’de farklı genişliklerdeki bir dizi GaAs/(Ga,Al)As kuantum kuyularının optiksel soğurmaları görünüyor [6].

Dikkat edilmelidir ki eksitonların içerdiği hafif-deşikler hemen hemen eksitonların içerdiği ağır deşikler kadar güçlüdür, bunun nedeni değerlik bant yapısının değişimleri (xy) düzlemi etkin kütlelerinde oldukça fazla miktarda hafif-deşik alt bandı oluşturur ve sonuç olarak bu durumların yoğunluğu ağır deşiklerle karşılaştırılabilecek durumdadır [6].



Şekil 2.15: 55 K'da farklı genişlikteki GaAs/(Ga, Al)As kuantum kuyularının bir dizisinin optiksel soğurması görünümü [6].

### 3. ARAÇLAR VE YÖNTEMLER

#### 3.1 Moleküler Demet Epitaksi (MDE)

Moleküler demet epitaksi, yüksek kaliteli tek kat tabakaları üretebilen bir tekniktir. MDE, çok yüksek vakum (UHV) tabanlı bir tekniktir. 1970'lerde MDE sayesinde yüksek saflıktaki yarıiletkenlerin üretilebileceği öğrenilmesinden beri bu teknik metallerin, yalıtkanların, yarıiletkenlerin ve süperiletkenlerin araştırma ve endüstriyel düzeyde epitaksiyel üretiminde yaygın olarak kullanılan bir teknik haline gelmiştir. Aslında MDE tekniği basit prensiplerle çalışır. Bu tekniğin temelinde ısıtılan katı yüzeyinden elde edilen atom ve atom kümeleri vardır. Isıtılan katı yüzeyinden elde edilen atom ve atom kümeleri UHV ortamına gönderilir. UHV ortamı içindeki artık ve yabancı gazlardan temizlenmiş ortamdır ve buradaki basınç  $10^{-11}$  Torr civarındadır. Bu sayede UHV ortamına gönderilen atom ve atom gurupları artık ve yabancı gazlarla etkileşmeden kolay bir biçimde alttaş üzerindeki sıcak yüzeye ulaşırlar. Buraya ulaşan atom ve atom kümeleri yayılır ve sonuçta büyüyen filimle birleşirler. Bu basit bir kavram olmasına rağmen büyük teknolojilere ulaşmak, aynılılık ve arayüzey kontrolü gerektiren materyal saflığına sahip kaliteli sistemler üretmeyi gerektirir.

MDE ve diğer büyütme tekniklerinin seçimi istenen yapıya ve ihtiyaçlara göre belirlenir. Örneğin MDE daha düşük büyütme hızından dolayı seri üretimlerde tercih edilmez. Bu durumda MDE yerine daha yüksek hıza sahip Liquid Phase Epitaxy (LPE) veya Metalorganic Vapour Phase Deposition (MOCVD) gibi diğer teknikler tercih edilir. MDE, arayüzey hızlılığı, arayüzeyin kontrolü ve etkili katkılarına gibi bazı özel gereksinimlere ihtiyaç duyulduğunda tercih edilir. Bunun yanında, vakum ortamındaki kontrol ve kaynak materyallerin kalitesindeki kontrol UHV tabanlı olmayan sistemlerle karşılaştırıldığında daha iyidir. Bu sayede MDE tekniğiyle çok daha kaliteli materyal saflığına ulaşmamız mümkündür. Bu özellikle yüksek mobilitedeki uygulamalar için üretilen Al içeren yarıiletkenlerde önemlidir [9].

### 3.1.1 MDE'nin Ana Parçaları

Şekil 3.1'de Gazi Üniversitesinde deney amaçlı kullandığımız MDE'nin VG80H modelinin değişik taraflardan görüntüsü görüntüyor. Şekil 3.2, MDE sistemini ana hatlarıyla gösteriyor. Şekil 3.2'de belirtilen parçalar MDE için vazgeçilmez düzeydeki parçalardır.

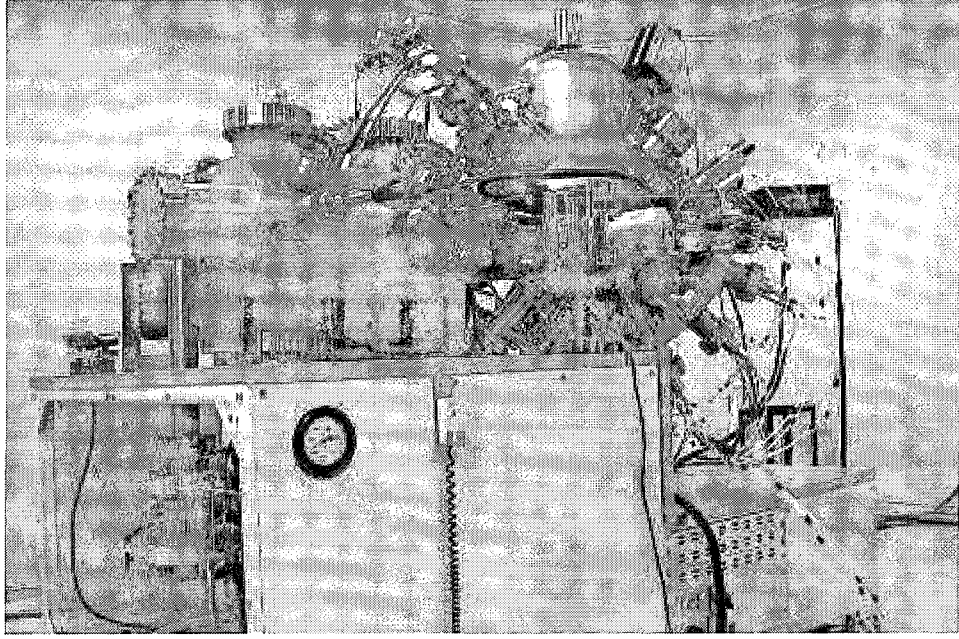
#### 3.1.1.1 Vakum Sistemi

Vakum sistemi paslanmaz çelikten yapılmış büyütme odasına bağlıdır. Yüksek vakum sağladığı için UHV (Ultra High Vacuum) yani ultra yüksek vakum olarak adlandırılır. UHV'nin görevi alttaşı büyütülmeden önce onu gazlardan arındırmaktır. UHV sisteminde alttaşı havasız vakumlu ortama taşıyan yükleme-kilit modülü vardır. Büyütme bölümünün tüm bileşenleri iç duvarlardan istenmeyen gazların atılması için gerekli olan uzun süreli 200<sup>0</sup> C'nin üstündeki fırınlama sıcaklığına dayanabilmelidir [9].

#### 3.1.1.2 Pompalama Sistemi

Pompalama sistemi artıkları en aza etkili biçimde düşürebilir. Tipik bir MDE'nin III-V tipi yarıiletkenlerdeki büyütme oranı yaklaşık 1 µm/h (1ML/sec)'dir, burada III gurubu için kısmi basınç ~10<sup>-6</sup> Tor'dur. Yaklaşık 10<sup>22</sup> cm<sup>-3</sup> atomik yoğunluklu kristallerde ( bu durumda safsızlık derişimi 10<sup>15</sup> cm<sup>-3</sup> 'ün altına düşürülmelidir ) safsızlık kısmi basıncı varsayılan saplanma sabiti olan ~10<sup>-13</sup> Tor 'un altına düşürülmelidir [10]. Pratikte, H<sub>2</sub> artık gazının oluşmasıyla ana basınç 10<sup>-11</sup> –10<sup>-12</sup> Tor aralığına düşürülür. Pompalama sistemi genellikle yedek Ti-süblimleşme ve belirli gazları pompalamaya yarayan kriyojenik pompalara sahip iyon pompalarından oluşur [9].





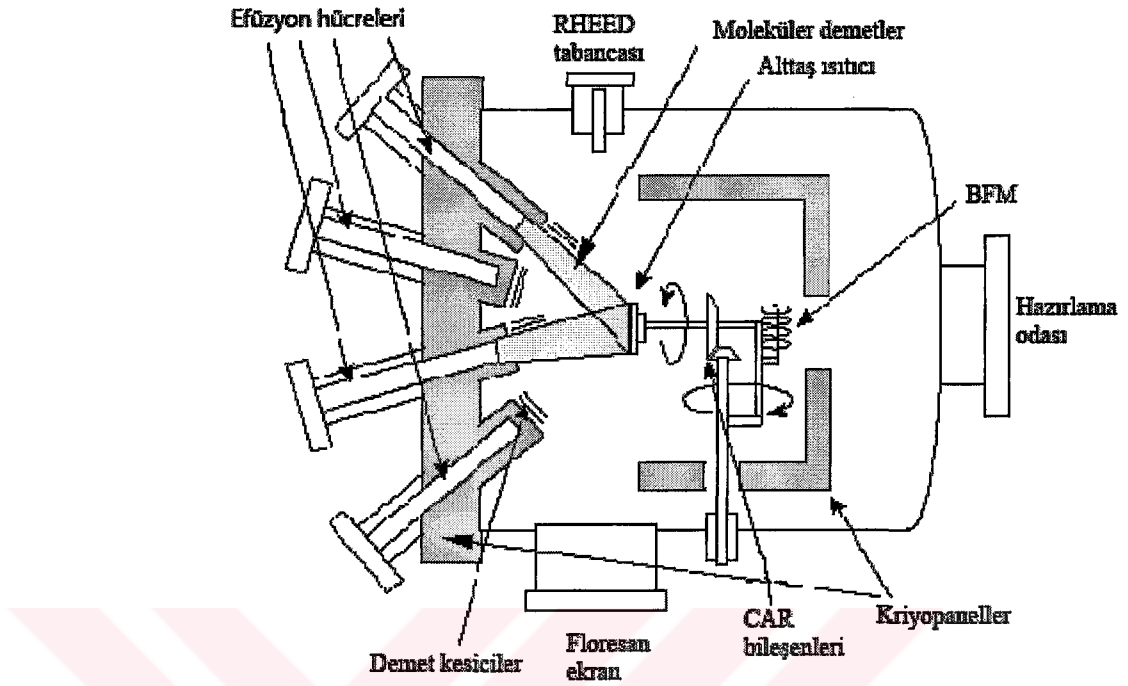
(a)



(b)

Şekil 3.1: Gazi Üniversitesi STARLAB’da bulunan VG80H MDE modeli.  
(a) alttaşın yerleştirildiği taraftan görüntü. (b) efüzyon hücreleri tarafındaki görüntü.





Şekil 3.2: MDE sisteminin ana hatları.

### 3.1.1.3 Sıvı N<sub>2</sub> Kriyopaneller

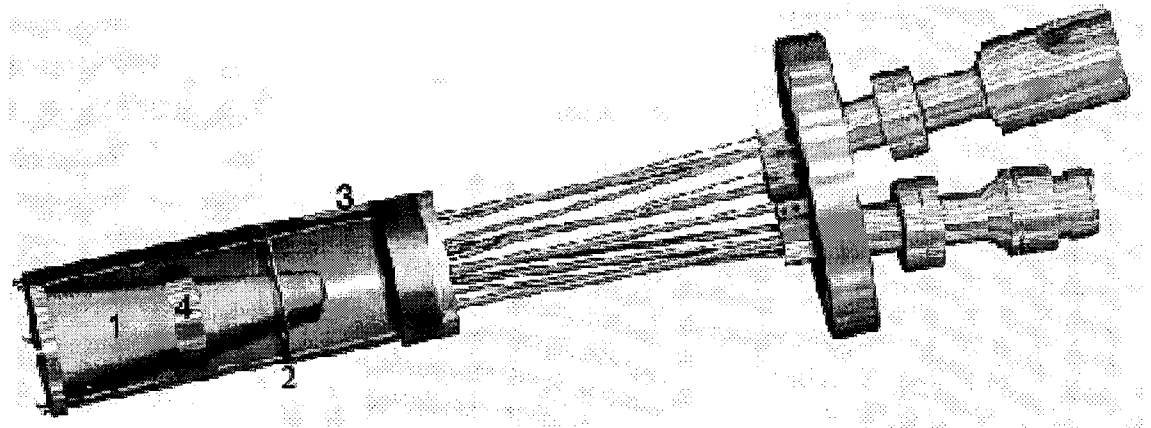
Sıvı N<sub>2</sub> kriyopaneller iç bölgede bulunan ana oda duvarı ve kaynak flanşında bulunur. MDE bir soğuk duvar tekniği olduğundan kriyopaneller sıcak hücrelere rağmen parçalardan tekrar buharlaşma olmasını önler. Bunun yanında farklı hücreler arasındaki termal izolasyonu sağlar [9].

### 3.1.1.4 Efüzyon Hücreleri

Efüzyon hücreleri MDE'nin ana parçalarıdır çünkü Efüzyon hücreleri iyi bir akış sürekliliğini, akış oranının sabitliğini ve materyal saflığını sağlarlar. Bunun yanında en uzun periyotlarda yüksek sıcaklıklara (1400 °C'ye kadar) dayanabilen parçalardan oluşurlar. Hücreler (genellikle 6 ile 10 arasında sayıları değişir) bir kaynak flanşın üzerine yerleştirilirler ve alttaş ısıtıcı üzerine odaklandırılırlar bu akışın aynılığını en iyi şekilde düzenler. Akış sabitliği bir çalışma gününde 1% den

daha iyi olmalıdır ve günden güne farklılıklar ise 5% den az olmalıdır [10]. Bu demektir ki sıcaklık kontrolü  $1000^{\circ}\text{C}$  de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  oynamalıdır [11]. Ayrıca efüzyon hücresinin geometrisi, kaynak kontrollü bir şekilde tüketilirken materyal akışı sapmayacak şekilde seçilmelidir. Akış dağılımındaki ilk analitik inceleme Knudsen hücreleri olarak adlandırılan hücreler üzerinde yapıldı. Knudsen hücrelerinde hücrede erime ve buharlaşma arasındaki termodinamik eşitlikten emin olmaya yarayan küçük delikler vardır. Aslında bununla birlikte Langmuir tipi akış hücreleri de MDE büyütülmesinde kullanılır. Langmuir tipi hücrelerde daha büyük delikler vardır ve bu deliklerden dolayı altına akış daha düşük sıcaklıkta ulaştırılır bu da daha düşük güç tüketimi ve ısıdan dolayı oluşan safsızlıkları önler [10]. Langmuir tipi hücrelerde akış yalnız materyalin buhar basıncı ile değil aynı zamanda hücre geometrisiyle de belirlenir [12].

Tipik bir akış hücresinin şematik çizimi şekil 3.2'de gösteriliyor, burada ana özellikler vurgulanıyor. Maden eritme kabı (1) genellikle piroolitik boron nitritten yapılır, burada fark edilir derecede gaz boşalması olmadan  $\sim 1300^{\circ}\text{C}$  ye kadar olan sıcaklıklara ulaşılır. Şekli silindirik veya koni şeklinde olabilir, bu şekil buharlaştırılan materyale göre değişir. Maden eritme kabının genişliği büyütme sürecinin birkaç ayna yetecek kadar büyük olmak zorundadır. Isıtma Ta-lifleri (2) tarafından sağlanır. Ta-lifleri bir çok Ta-metal yaprağından (3) oluşur.



Şekil 3.2: Tipik bir efüzyon hücresi [9].

Termoçifti (4), materyal ısısını ölçmek için uygun bir şekilde yerleştirilir. Burada ısı ayarlaması yüksek duyarlılıklı PID regülatörü tarafından sağlanır.

Efüzyon hücrelerinde gerektiğinde demet akışını kesmek için demet kesiciler vardır. Mekanik veya havalı kaynak demet kesiciler genellikle Ta ve Mo'denden yapılır. Kesicinin akışı tetiklemesi için efüzyon hücresinin önüne yerleştirilmiştir. Kesiciler büyütme oranından daha hızlı çalışmalıdır. Tipik bir büyütme oranı 0,1 s'dir. Kesiciler tekrar üretimin sistemli yapılabilmesi için bilgisayar kontrolündedir. Aynı zamanda hücreler ısıtma sonucu oluşan gazı kaçırmamalıdır. Çatlatma hücreleri, V ve VI gurubu elementlerinin buharlaşması için önemli bir kaynak türüdür. Bu hücrelerde materyal önce daha büyük kapasiteye sahip rezervinden ısısal olarak buharlaştırılır daha sonra bu buhar, moleküllerin dimerize edildiği bir tüpün içinden daha sıcak olan çatlatıcı bölgeye geçer. Katkılayıcılarla ilgili efüzyon hücreleri materyalin ince dilimlerinden yapılmış kaynaklardan geçen DC akımıyla ısıtılır bu yöntem yüksek materyal akışına ihtiyaç duyulmadığında efüzyon hücrelerine geçerli bir alternatiftir. Buharlaştırma metodu daha hızlı bir cevap ve daha düşük bir termal yüklemeyi garanti eder. Bu sayede kirlenme oranı daha düşük seviyede olur [9].

MBE ve MOCVD'nin avantajlarını birleştirme çabaları gaz kaynaklı MDE (GSMDE), metalorganik MDE (MOMDE), ve kimyasal demet epitaksisi (CBE) gibi tekniklerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu tekniklerde yarıiletken büyütmesindeki katyon ve/veya anyon katı kaynakların yerine dışarıdan monte edilmiş gaz kaynakları vardır [13].

### **3.1.1.5 Altaş Manipulatörü**

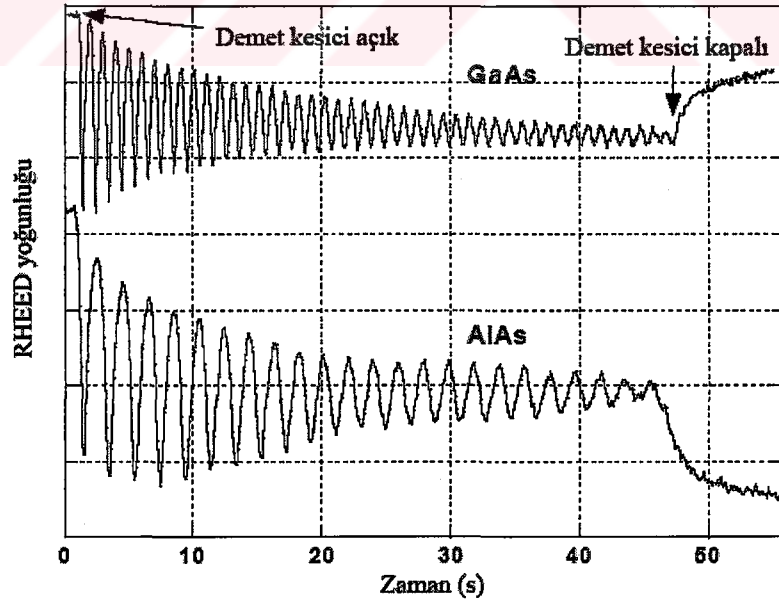
Sürekli kendi etrafında azimutal (belirli açılarla) dönebilme kabiliyetine sahiptir ve kısaca CAR olarak adlandırılır açılımı 'continuous azimuthal rotation' dir. Bu dönmenin amacı çoklu tabaka sistemlerinde tabakadan tabakaya ve tabaka üzerinde ki geçişlerde tekdüzeliği korumaktır. Altaşın karşısına bir iyonizasyon ölçücüsü olan demet akış monitörü (BFM) konmuştur. BFM molekül demet yoğunluğunun günden güne değişimini gösterir ve bu sayede demet akışının durumu

saptanır. Bir manipülatörün üzerinde Mo ve Ta alttaş tutucuları vardır. Bu tutucunun üzerine alttaş ya In ve Ga filmleri ile yapıştırılır veya halka şeklindeki mengeneyle tutturulur [9].

### 3.1.1.6 MDE İçinde Bulunan Analiz Aygıtları

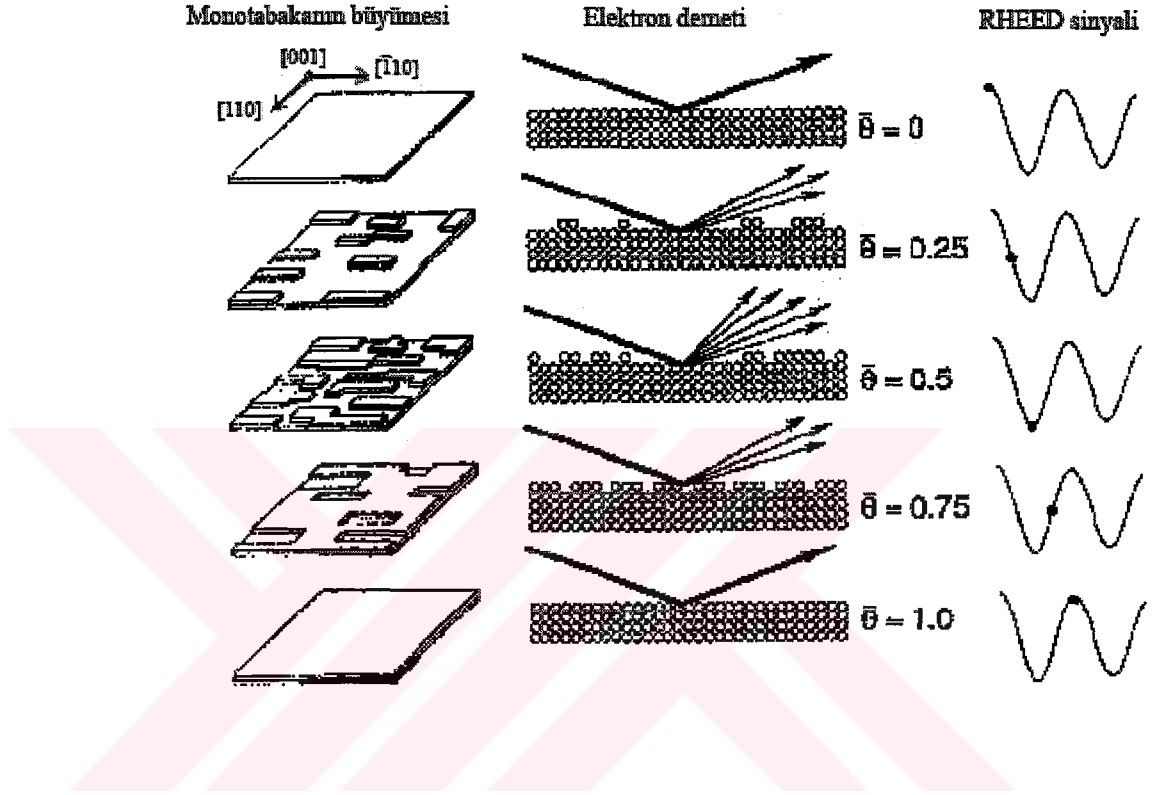
Bu aygıtlar arasında en değerli ve karmaşık olan yüksek enerjili elektron kırınımı (Reflection High Energy Electron Diffraction (RHEED))'dır. Bu teknik yüksek enerjili (20 KeV'a varan) elektron demeti kullanır. Bu elektron demeti doğrudan örnek üzerine gider ve bir kaç derecelik açıyla örnek üzerinden yansır.

Şekil 3.4'deki çizim  $As_4$  akışı altında Ga ve Al kaynakları açıldıktan sonra (2x4) GaAs yüzeyinin 2x yönelimindeki tam yansıma beneklerinin yoğunluğunu gösteriyor. Her iki durumda da statik durumlara bağlı olarak başlangıçta yoğunluk azalır ve kaynaklar tekrar kapanana kadar yoğunluğun düşmesiyle periyodik titreşimler başlar. Bu titreşimlerin nedeni Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4: GaAs (üstte) ve AlAs (altta) büyütüldüğü sırada 2x yönelimindeki ayna yansımaları sonucu oluşan RHEED osilasyon yoğunluğu [9].

Bir kaç derecelik açıyla yüzey üzerine gelen elektronlar simetrik olarak yerleştirilmiş floresans ekran üzerinde kırılma desenleri oluşturur.

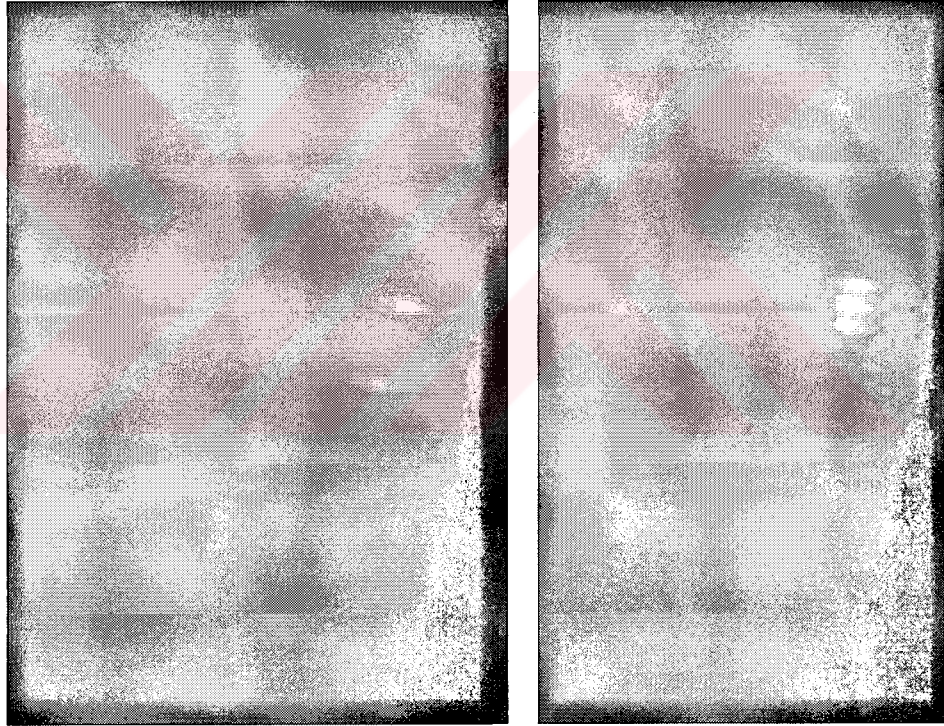


Şekil 3.5: Elektron tabancasından çıkan yüksek enerjili elektronun yüzeye geldikten sonra yüzeyin durumuna göre kırınımı [14].

Yüksek enerjili elektron demetinin yüzeye birkaç derecelik açıyla gelmesinden dolayı demet ilk birkaç atomik tabaka içerisinde saçılır ve sonuç olarak yüzey duyarlılık kırılma deseni oluşur. Şekil 3.5'te görüldüğü gibi elektron tabancasından gelen yüksek enerjili elektronlar yüzeyin durumuna göre hareket eder. İlk durumda yüzey düz olduğu için gelen elektron demeti ayna yansıması yapar dolayısıyla elektronların çoğu flüoresan ekran üzerine düşer ve sonuçta flüoresan ekranda parlak noktalar oluşur. Bu durumda RHEED sinyali en yüksek seviyededir. Yüzey büyümeye başladığında yüzeyde önce kümelenmeler oluşur. Bu kümelenmelerden dolayı yüzey pürüzlü hale gelir ve bunun sonucu olarak gelen elektron demeti ayna yansıması yapamaz saçılır. Flüoresan ekran üzerine gelen elektronlar dağınık olduğu için ekran üzerinde dağınık zayıf noktalar oluşturur.



Büyüme devam ettiğinde kümelenmeler büyür ve adacıkları oluşturur bunun sonucu olarak saçılma artar ve RHEED sinyali minimuma iner. Bir süre sonra adalar birleşerek tabakayı oluşturur. Yüzey de düzgün bir tabaka oluşmaya başlar, bunun sonucu olarak elektron demeti daha az saçılır dolayısıyla RHEED sinyali yükselmeye başlar. Bir süre sonra yüzeyde tabaka oluşumu tamamen biter ve RHEED sinyali maksimuma ulaşır. Şekil 3.6'da (100) GaAs için tipik bir kırınım deseni gösteriliyor. Burada dikkat etmemiz gereken yer tam yansımanın (en parlak benek) etrafındaki düzensiz çizgilerin yoğunluğu her iki azimutta periyodik olduğudur. Bu azimutlar bir 2x (sol, [010]) yönelimi veya bir 4x (sağ, [010])'da gözlenebilir.



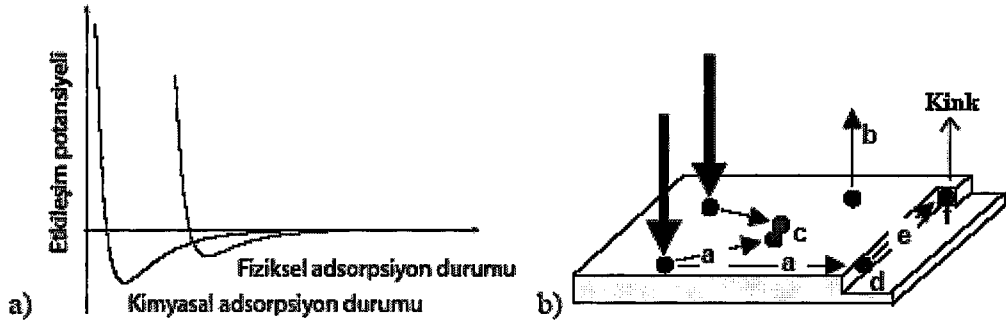
Şekil 3.6: 2x (sol, [110] yönelimi) ve 4x (sağ, [101] yönelimi) saçılma deseni (2x4) tekrar oluşmuş (100) GaAs yüzeyinden elde edilen desen [9].

RHEED büyütme sırasında analizi mümkün kılar. Bu özelliğinden dolayı RHEED, MDE sisteminin en önemli aygıtlarından biridir. Çünkü büyütme sürecinde büyütme odasında neler olduğunu bilmemiz tabaka kontrolü açısından oldukça önemlidir.

Diğer bir analiz aygıtı da dört uçlu atık gaz analizörüdür (RGA). RGA iyonizasyon ölçücülerinin önemli bir tamamlayıcısıdır. RGA büyüme ortamındaki havayla ilgili bilgi verir. Bu sayede sistemin temizliği ve kirliliğin kaynağı hakkında bilgi ediniriz. Mesela kirlilik yetersiz fırınlamadan mı, verimsiz pompalamadan mı yoksa materyal kaynakların ısıtılmasından mı kaynaklandığını öğrenebiliriz. Bu sistemlere ek olarak yüzey duyarlılığı analiz araçları, elipsometri, yansımakırılma spektrometresi veya lazer küçük aralık ölçücü opsiyonel olarak eklenebilir [9].

### 3.1.2 MDE'deki Büyüme Süreci

MDE içerisindeki büyüme süreci moleküler demetlerin altaşa ulaşmasıyla başlar. başlangıçta kısa ve uzun aralık düzeni oluşur. Diğer taraftan burada moleküler demetlerin gaz fazının düzensizliği vardır. MDE içerisindeki moleküller çarpışmaz çünkü moleküllerin çarpışması için ortama özgü olan serbest yolu tamamlaması gerekir. Bu yolu basınç arttıkça molekül daha hızlı tamamlar fakat MDE'de altaş ve kaynak arasındaki mesafe ortalama serbest yoldan çok kısa olduğu için ve atık gaz ile moleküler demet basınçları çok düşük olduğu için çarpışma olmaz. MDE'de demet akışları altaş üzerine odaklanmıştır. Burada yüzeye odaklanmış birden fazla moleküler demet vardır. Atom ve moleküler türler yüzey üzerinde fiziksel veya kimyasal olarak tutunurlar bu şekil 3.7a'da grafik olarak görülebilir. Yüzeye gelen atomlar değişik süreçlere uğrayabilirler bu şekil 3.7b de gösteriliyor. Burada atomlar düz yüzey üzerinde difüzyon olabilirler (a), tekrar buharlaşabilirler (b), diğer atomlarla birleşerek iki boyutlu kümelenmeler oluşturabilirler (c), adımla birleşebilirler (d), daha fazla göç ederek (e), kinkle birleşebilirler (f).



Şekil 3.7: a) Örnek yüzeye ulaşan bir atom veya molekülün örnek yüzeyle etkileşme potansiyeli. b) MDE’de örnek yüzeyinde oluşan önemli durumlar [9].

Yüzey üzerine gelen molekül demetleri önce ada adımları oluşturur daha sonra bu adımlar birleşerek düz tabakayı oluşturur.

AlGaAs/GaAs üretiminde As kaynak hücresi sürekli çalışır. Kaynak hücre’de önce  $As_4$  buhar haline geldikten sonra bu hücrede bulunan çatlatma bölgesinde  $As_2$ ’ye dönüştürülür. Bunun sebebi  $As_2$ ’nin tutunma oranının  $As_4$ ’ten fazla olmasıdır. As hücresi açıkken Al veya Ga içeren tabakalardan hangisi büyütülecekse o hücre açılır. Tabakadaki Al veya Ga oranı zaman tutularak ayarlanır çünkü her tabakanın belirli bir oluşma zamanının vardır [9, 12].

### 3.2 Mikrofabrikasyon

MDE ile üretim yapıldığında uyulması gereken süreçler vardır bunlar kaliteli bir üretim yapmak için gereklidir. Bu uyulması gereken süreçleri aşağıdaki gibi guruplara ayırarak sıralayabiliriz. Bu süreçler kullanılan cihaza göre değişir bizim kullandığımız cihaz VG Semicon V80H modelidir. Büyütülen yarıiletken yapı GS0008 kod ismiyle isimlendirilmiştir.

#### 3.2.1 MDE ‘yi Hazırlama

MDE’de desorpsiyon meydana gelmeden önce kullanılacak vakum sistemi hazır hale getirilmiştir. İlk önce sistemin (MDE) büyütme öncesi soğutulması



gerekir çünkü daha sonra deneye hazırlık aşamalarındaki kaynak sıcaklıkları vakum sisteminin aşırı ısınmasına neden olabilir. Buna ek olarak soğutma işlemi soğuk kriyopanel üzerindeki yabancı maddelerin ve diğer gazların yoğunlaşmasına yardım eder. Böylece vakum şartları büyütme sırasında daha uygun olur. Sistemin soğuması iki-basamaklı süreçle tanımlanır. Birincisi alt kriyopanel, sistem içine akan sıvı azot tarafından soğutulur. Madde örneklerinin bulunduğu üst kroyo-panel soğutulmadan önce meydana gelen her bir kirliliğin yapışması için alt kroyo-panel ilk olarak soğutulmuştur. Alt kroyo-panel sıvı-azot sıcaklığında soğutulduktan sonra azot akışı üst kriyopanel yöneltmesi yapılmıştır. Hem alt hem de üst kriyopaneller bir defa soğutulduğu zaman, soğutma sistemi hem alt hem de üst kriyopanellerden sürekli azot akışına izin verilmiştir.

Soğutma tamamlandıktan sonra kaynak hücreleri bütün gazlardan arıtılmıştır. Hücrelerin gazlardan arındırılması, sistemin sıcak durumda iken soğuk duruma gelmesi için geçen bir günlük süre müddetince kaynaklara bulaşan herhangi yabancı katkı maddelerinin atılmasıdır. Uygun şekilde hücrelerden atık gazları arındırmak için 10 dakika her hücrenin istenilen büyüme sıcaklığının en az 10 °C'nin yukarısına ramp edilmiştir. Hücrelerdeki atık gazların sıcaklığı maksimum olduğu zaman hücre kapakları, kapak yüzeyindeki atık maddeler için 5 dk kapatılmıştır. Bazı durumlarda istenilen büyütme sıcaklığı, gazlardan arındırma işlemi sırasında tam olarak bilinmiyordu. Bu durumda atık maddelerin sıcaklıkları ve bu işlem sırasında geçen zaman artabilir. Sadece büyütme işleminde kullanılan hücrelerin yabancı maddelerden arındırılması yeterli olmuştur.

Ga ve In hücreleri bir taban ve bir uçtan olmak üzere ikili filament şekline sahiptir. Uçtaki madde birikimini engellemek için uç filament tabandan normal olarak 50°C'den fazla sıcaklıkta tutulmuştur.

Atık maddeleri yok etme işlemi tamamlandığı zaman hücre sıcaklıkları istenilen büyüme sıcaklığına getirildi. Büyüme sıcaklıkları önceden yapılan ayarlamalara dayanarak seçilmiştir. Materyal için belli bir büyüme oranı elde etmede belirlenmiş bir sıcaklık değeri seçilmiştir. Bu çalışmada Ga atomunun

seçilen büyüme oranı 0.7 ML/s dir. Her bir tabakanın istenilen skiometrik oranını elde etmek için diğer materyallerin büyüme oranları buna istinaden seçilmiştir.

Hücreleri atık maddelerden arındırma işleminden sonra okunan akı panelindeki ölçümlerin ve hücre kapaklarının açılmasıyla her bir hücrenin Demet Eşdeğer Basıncı (BEP) miktarı ölçülmüştür. As, BEP miktarı seçildi ve böylece As nin Ga' ma oranı 20 oldu. Bu orana ulaşmak için As demet kesicisi açıldı, durum not edildi ve sonra kapatıldı.

### 3.2.2 Oksit tabakasının kaldırılması

Yeni bir alttaş MDE odasına yerleştirildiğinde alttaş yüzeyi oksit içerir. Oksitlenmiş yüzey amorfur ve oksitlenmiş yüzeye depolanan madde yine amorf olduğundan bu yüzeydeki oksitlenme epitaksiyel işlemini bozar. Alttaş üzerinde büyüme meydana gelmeden önce yüzeydeki bu oksidi uzaklaştırmak gereklidir. Uzaklaştırma (kaldırma) süreci termal yolla oksit tabakasının kaldırılması olarak adlandırılır [9].

Ana kapak, MDE odası içine numunenin girişi için kapatılmıştır. Bir transfer mili MDE manipülatör arabasından molibden-tezgah (blok) ile transfer için kullanılmıştır. As demet kesici önceden tayin edilen set değerinde açılmıştır. RHEED sistemi yüzey üzerindeki farklı desenleri görüntülemek için kurulmuştur. Numune üzerine As akışıyla  $T_s$  alttaş sıcaklığı vakum dışında elle tutulan sıcaklık ölçer aleti ile yaklaşık olarak ölçülmüştür. 550 °C'den başlayarak her bir dakikada 5 °C'e artışla 580 °C'ye ulaşılmıştır. İki basamaklı yükseltme süreci istenilen 580 °C'deki kaldırma sıcaklığında titreşimi önlemek için kullanılmıştır.

Hedeflenen kaldırma sıcaklığına ulaşıldığı zaman RHEED deseni yüzeydeki oksit başlangıcını belirten ayna yansımada yoğunluk artışı dikkatle gözlenmiştir. Bu ayna yansımadaki artıştan sonra 15 dk süreyle numune 580 °C'de tutulmuştur. Bu 15 dakikalık sürede RHEED kapağı fosfor ekranının As kirlenmesini önlemek için kapalı tutulmuştur.

Tam olarak 15 dakika bekledikten sonra RHEED kapağı açılmıştır ve farklı desenler RHEED ekranında gözlenmiştir. Elektronların ayna yansımaları sonucu oluşan ikinci ve üçüncü sıralı kırılma noktaları aynı yoğunlukta gözlenerek yüzeyin oksitlenmeden arındırıldığı tespit edilmiştir. Normal şartlar altında oksit tabakasının temizlenmesi 15 dk içinde gerçekleşir.

### 3.2.3 GaAs Tampon Tabakasını Büyütme

Oksit alttaştan kaldırıldıktan sonra GaAs yüzeyi açığa çıkmıştır. Elde edilecek ince tabakaların kalitesine bağlı olarak, GaAs yüzeyi büyütme işlemi için pürüzsüz olmayabilir bu yüzden tampon tabaka yüzeyi büyüme için uygun duruma getirmede önemlidir [9]. 0.5 µm kalınlıklı Be katkılı GaAs tampon tabaka gerekli yapıların büyütülmesinden önce alttaş üzerinde büyütülmüştür. Tampon tabakanın katkılarına konsantrasyonu yaklaşık  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  tür.

Tampon tabaka desorpsiyonu için numune sıcaklığı oksit desorpsiyon sıcaklığından 5 °C daha yükseğe yani 585 °C'ye yükseltilmiştir. Büyütmenin homojen bir biçimde olabilmesi için alttaş eksen üzerinde dönmeye ayarlanmıştır. Tampon tabakanın büyütülmesine başlanması için Ga ve Si demet kesicileri açılmıştır. Numune MDE'nin içine yerleştirildikten sonra Arsenik demet kesici örnek büyüme bitimine kadar açık kalmıştır. 0.7 ML/s lik Ga büyüme oranıyla tampon tabaka 500 nm kalınlığına toplam 42.1 dk büyüme süresi ile ulaşmıştır. Bu toplam büyüme zamanı;

$$t = d \left( \frac{2}{ra_0} \right) \quad (3.1)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Burada t gerekli tutunma zamanı, d istenilen kalınlık,  $a_0$  çöken materyallerin örgü sabiti ve r ise ML/s deki tutunma oranıdır.

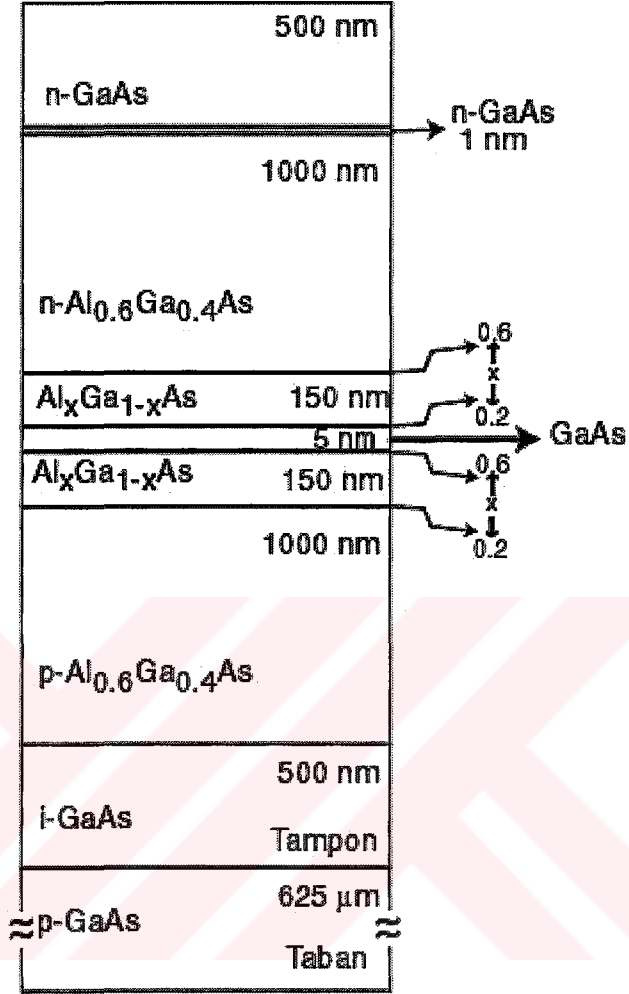
500 nm kalınlığında GaAs tampon tabakanın büyütülmesi için gerekli süre denklem (3.1)'deki değerlerin yerlerine yazılmasıyla aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$t = 5000 \text{ \AA} \left( \frac{2}{0.7 \text{ ML/s} \left( 5.6535 \text{ \AA} \right)} \right) = 2526.9 \text{ sec} = 42.1 \text{ min} \quad (3.2)$$

### 3.2.4 Tabaka Büyütme

Büyüttüğümüz tabaka GaAs/AlGaAs tek kuantum kuyulu yarı iletken yapıdır. Tampon tabaka büyütme işleminden sonra sıcaklık 590<sup>0</sup>C'ye yükseltilmiştir. Bilgisayar kontrollü süreç, 500 nm GaAs kuyusu, 1000nm Al<sub>0,6</sub>Ga<sub>0,4</sub>As bariyerlerinden ayrılarak, büyütölmek için kullanılmıştır. 0.7 ML/s lık Ga büyüme oranı ile gerekli Al büyüme oranı 0.3 ML/s dir. Sonuçta tekli kuantum kuyulu yapı 500nm'lik GaAs üst tabaka ile kaplanmıştır. Elde edilen GaAs/AlGaAs yarıiletken ince filmin yapısı şekil 3.8'de görölmektedir.

## GS0008



Şekil 3.8: Gazi Üniversitesi STARLAB'da büyütülmesi amaçlanan AlGaAs/GaAs yapısı. Kod ismi GS0008'dir.

### 3.2.5 MDE Vakum Sisteminin Soğutulması

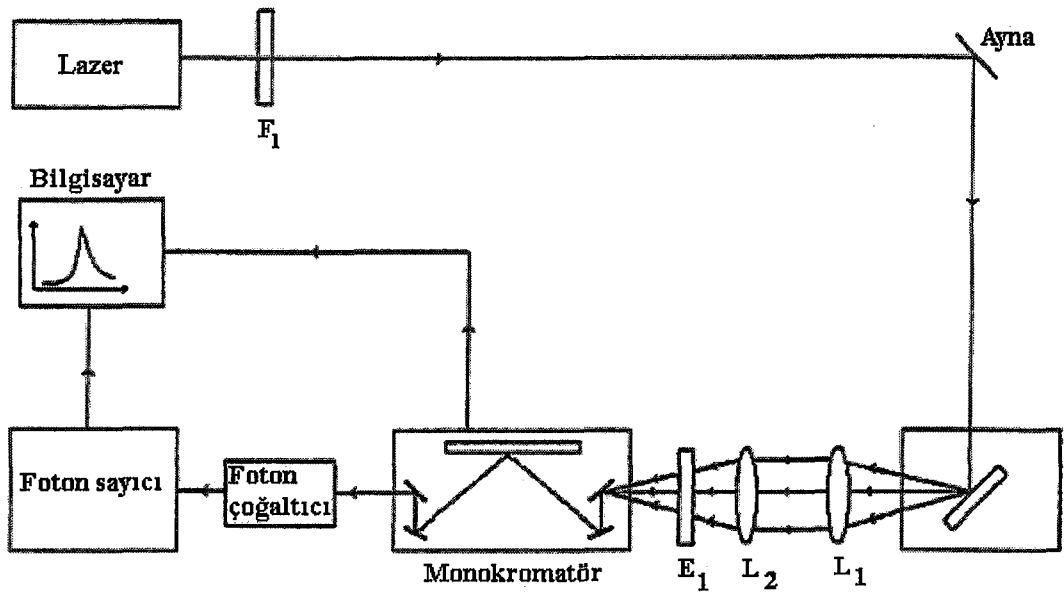
Her büyütme tamamlandıktan sonra, altta sıcaklığı dakikada  $50^{\circ}\text{C}$  olmak üzere  $350^{\circ}\text{C}$ 'ye arsenik akışı altında yükseltilmiştir. Numune sıcaklığı  $350^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaştığı zaman arsenik demet kesici kapatılmıştır ve numune ısıtıcısı destek güç kurulmuştur. Tipik olarak manipülatör için destek güç, manipülatör sıcaklığını yaklaşık  $250^{\circ}\text{C}$ 'de tutmuştur. Numune sıcaklığı  $300^{\circ}\text{C}$ 'nin altına düştüğünde MDE odasından çıkartılmıştır ve yükleme arabası üzerine yerleştirilmiştir.

### 3.3 Analiz Araçları

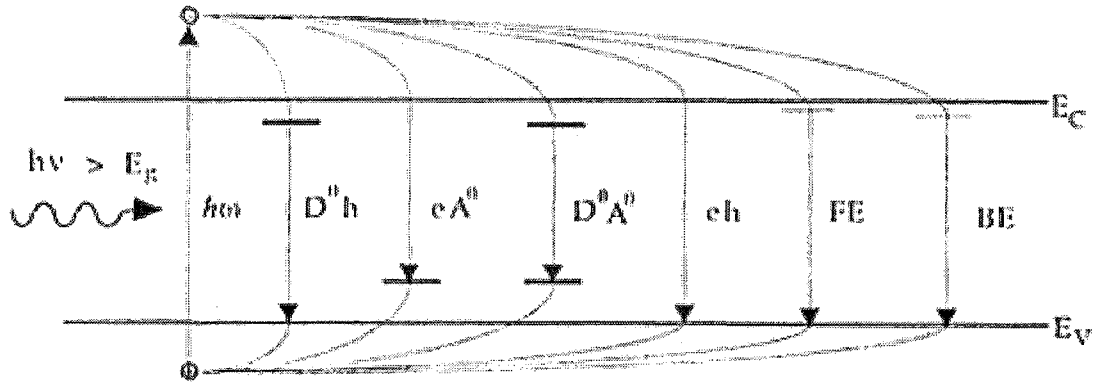
#### 3.3.1 Fotolüminesans

Fotolüminesans spektroskopisi yapıların karakterizasyonu için güçlü bir optiksel metottur. Fotolüminesans silikon ve III-V gurubu yarıiletken elementlerdeki safsızlık ve kusurları bulmak için kullanılabilir. Fotolüminesans optiksel özellik taşıdığı için yarıiletkenlerdeki bant aralığını belirlemede de kullanılır.

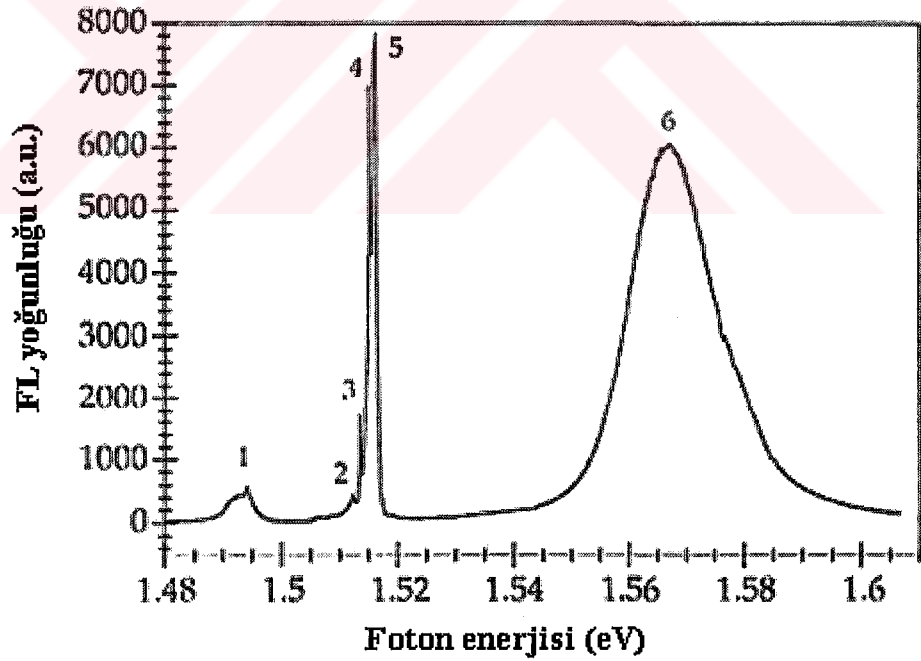
Fotolüminesansın çalışma prensibi uyarılma ve tekrar birleşmeye dayanır. Işığ absorplayan yapıda bir elektron-deşik çifti oluşur. Çünkü gelen ışığın elektronu uarmasıyla elektron değerlik banttan iletkenlik bandına sıçrar bu sıçrama sırasında ardında bir deşik bırakır, bir süre sonra elektron geri döner ve elektron deşik tekrar birleşir sonuçta foton oluşur bu fotonun enerjisi bant aralığına eşittir. Tüm bunlardan sonra yapıdan yayınlanan fotonlar bilgisayara bağlı detektör tarafından toplanır ve enerjileri belirlenir [15]. Bu enerjilerin grafiğinin çizimi yapımız hakkında önemli bilgiler verir. Şekil 3.9'da fotolüminesansın ana hatları görünüyor. Lazer uyarma için gerekli lazeri üretir. Monokromatör belirli dalga boylarında çalışmamızı sağlar.



Şekil 3.9: Fotolüminesans aygıtının ana hatları [16].



Şekil 3.10: Şekil sırasıyla ( $D^0,h$ ) Vericilerden değerlik banda geçişleri, ( $e,A^0$ ) iletkenlik bandından alıcılara, ( $D^0,A^0$ ) vericilerden alıcılara, ( $e,h$ ) banttan banda, ( $FE$ ) ve ( $BE$ ) serbestlik ve geçiş ışınımsal geçişlerini gösteriyor. Bunlar yarıiletkenlerde görülen fotoluminesans geçişlerdir [17].



Şekil 3.11: Şekil tipik bir düşük enerjili FL grafiğini gösteriyor. Burada (1) banttan alıcıya ( $e,A^0$ ), (2) ve (3) eksiton bağları ( $BE$ ), (4) ve (5) serbest eksitonlar ve (6) kuantum kuyusundaki ilk elektron durumundan ilk ağır deşik durumuna geçişi gösteriyor [17].

Şekil 3.11'den de anlaşılacağı gibi fotoluminesanstan elde edilen grafikten yararlanarak ürettiğimiz yapı hakkında özellikle optiksel bilgiler ediniriz.

### 3.3.2 Elipsometri

Elipsometri genel olarak polarizenmiş bir dalga vektörünün polarizasyon durumunun ölçülmesi ile tanımlanan bir yöntemdir. Her ne kadar, elektromanyetik dalganın polarizasyon durumunun ölçülmesi önemli olsa da, elipsometri asıl olarak, polarizasyon durumunu modifiye eden bir optik sistem hakkında bilgi edinilmesi için yol göstermektedir. Elipsometrinin genel şemasında, polarizenmiş bir ışık dalgasının, incelenen optik sistemle etkileşmesine izin verilmektedir. Bu etkileşme, ışığın polarizasyon durumunu değiştirir. Elektromanyetik bir dalganın polarizasyon durumu, elipsometrik parametreler olarak bilinen  $\Psi$  ve  $\Delta$  değerleri ile verilir. Monokromatik ve polarizasyon durumu belli olan bir elektromanyetik dalganın istenilen gelme açısı altında, optik bakımdan farklı olan ortamların sınır yüzeyine düşürülmesi ile bu sınır yüzeyinden yansıyan veya geçen ışığın polarizasyon durumu değişir. Yansıyan veya geçen ışığın polarizasyon durumunun belirlenmesi ile kullanılan malzemenin optik parametreleri belirlenebilir .

Gelme düzlemine paralel polarize olan yansıma genliğinin büyüklüğünün,  $R_p$ , dik polarize olmuş yansıma genliğine,  $R_s$ , oranı elipsometrik  $\Psi$  parametresinin ifadesini vermektedir:

$$\tan \Psi = \frac{|R_p|}{|R_s|} \quad (3.3)$$

$R_p$  ve  $R_s$  arasındaki faz farkı, ikinci elipsometrik parametre olan  $\Delta$  dır:

$$\Delta = \Delta_p - \Delta_s \quad (3.4)$$

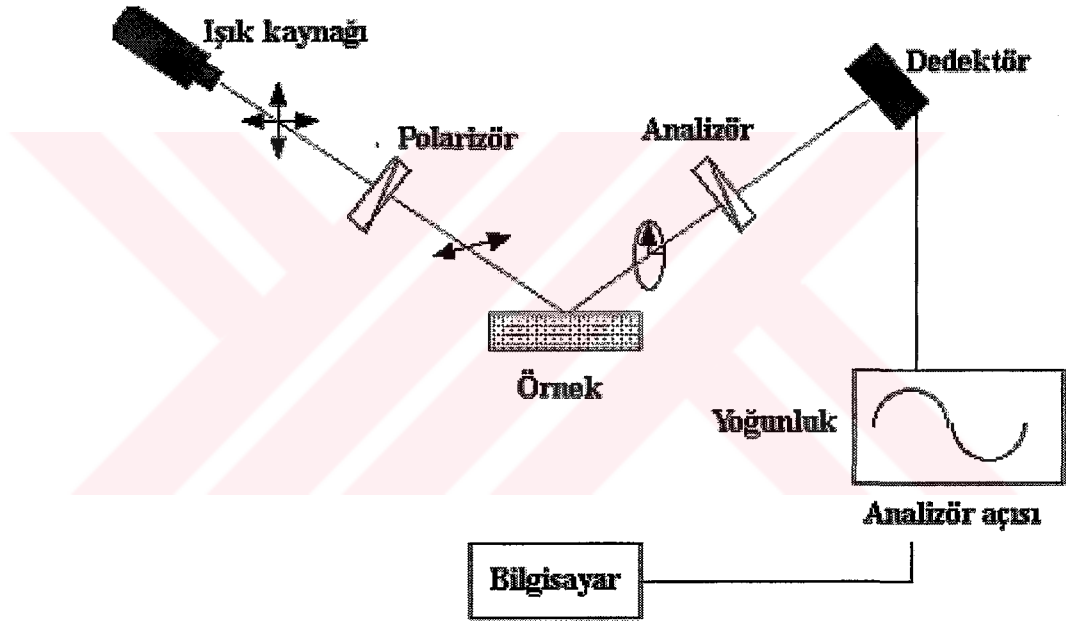
Burada  $\Delta_p$  ve  $\Delta_s$  sırasıyla,  $R_p$  ve  $R_s$  in fazlarıdır.

Elipsometrik parametrelerden yararlanarak; elipsometrik oran şöyle ifade edilebilmektedir:



$$\rho = \left| \frac{R_p}{R_s} \right| e^{i(\Delta_p - \Delta_s)} = \tan \psi e^{i\Delta} = \frac{R_p}{R_s} \quad (3.5)$$

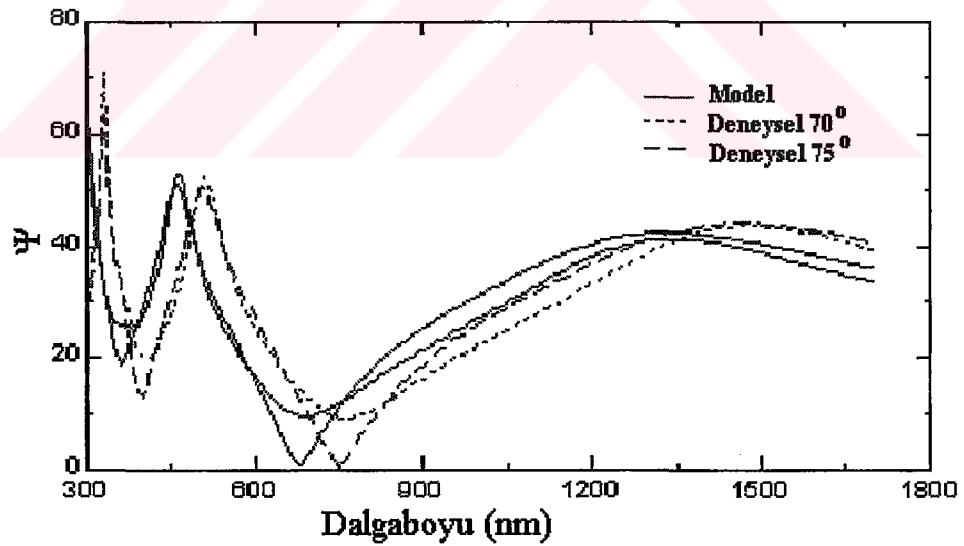
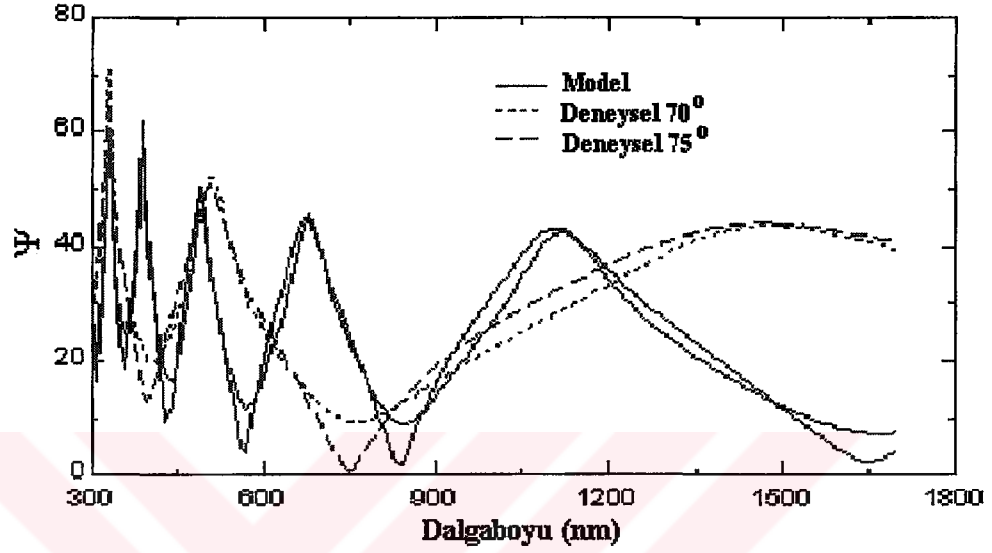
Bu denklem elipsometrik parametrelerle Fresnell katsayıları, dolayısı ile yapının optik sabitleri arasında ilişki kurulabileceğini göstermektedir [18]. Şekil 3.12’de elipsometrik ölçüm yapan bir aygıtın ana hatları gösterilmiştir. Örneğe ışık belirli açılarda gönderilir ve gönderilen bu ışık örnekle etkileştikten sonra analizöre geçer buradan da detektöre. Işık detektöre geldikten sonra inceleme başlar.



Şekil 3.12: Elipsometrinin ana hatları. Işık kaynağından gelen ışık önce polarizleniyor daha sonra örnekle belirli açılarda temasa geçtikten sonra analizöre gidiyor.

Elipsometride veri analizi yapılırken belirli bir sıra izlenir. Önce elipsometri cihazından veriler elde ederiz. Bu veriler grafiğe dönüşür. Daha sonra bilgisayar programıyla incelediğimiz yapıya benzer basit bir yapı modeli oluştururuz. Sonuçta elimizde deneysel grafik ve oluşturduğumuz modelin grafiği vardır. İki grafik üst üste gelecek şekilde yeni bir grafik oluşturulduktan sonra modelimizdeki

parametreleri değiştirerek deneysel grafiğe yakın bir grafik elde etmeye çalışırız ve deneyselle yaklaştığımızda gerçek yapımız hakkında bilgi edinmiş oluruz [19]. şekil 3.13'te (a) kötü bir eşleşmeyi (b) iyi bir eşleşmenin nasıl olduğu gösterilmiştir.

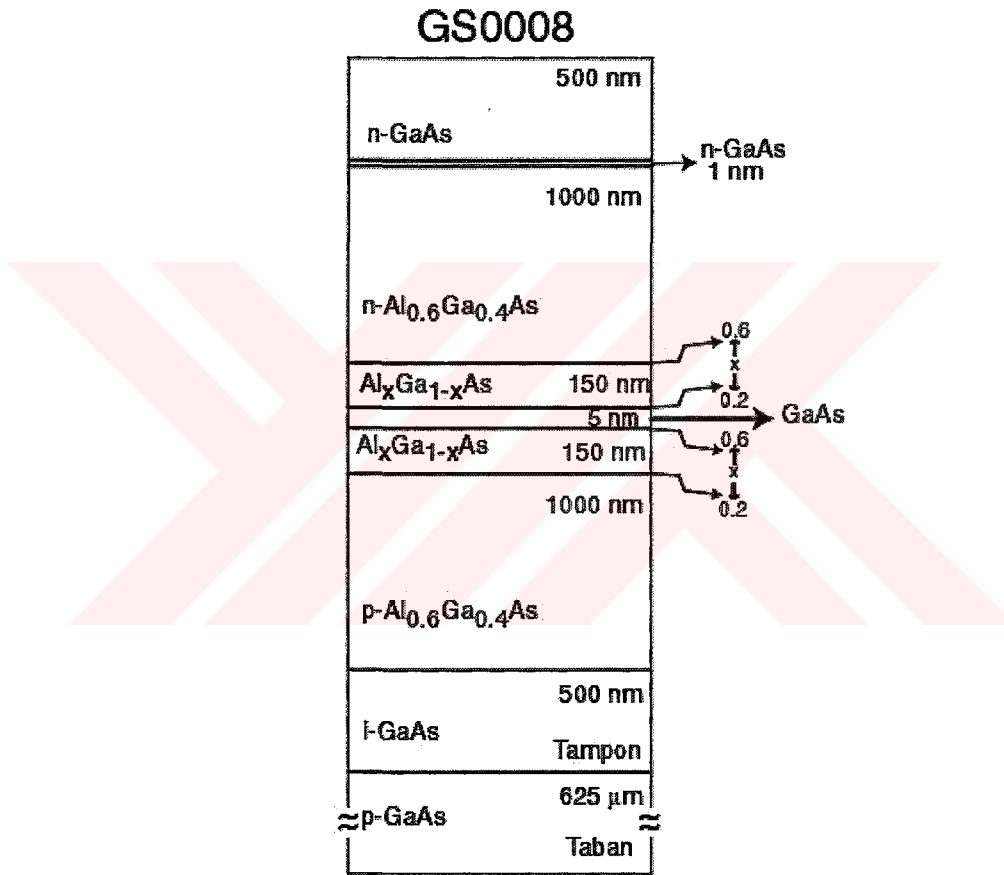


şekil 3.13: Elipsometri ve modelin grafik eřlemesi,(a) kötü eşleşme, (b) iyi bir eşleşme [19].

## 4 DENEYSEL SONUÇLAR

### 4.1 Giriş

Bu bölümde Gazi Üniversitesi STARLAB'da büyütülen GS0008 kodlu  $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}/\text{GaAs}$  yarıiletken kuantum kuyulu yapıdan elde edilen sonuçlar incelenmiştir.



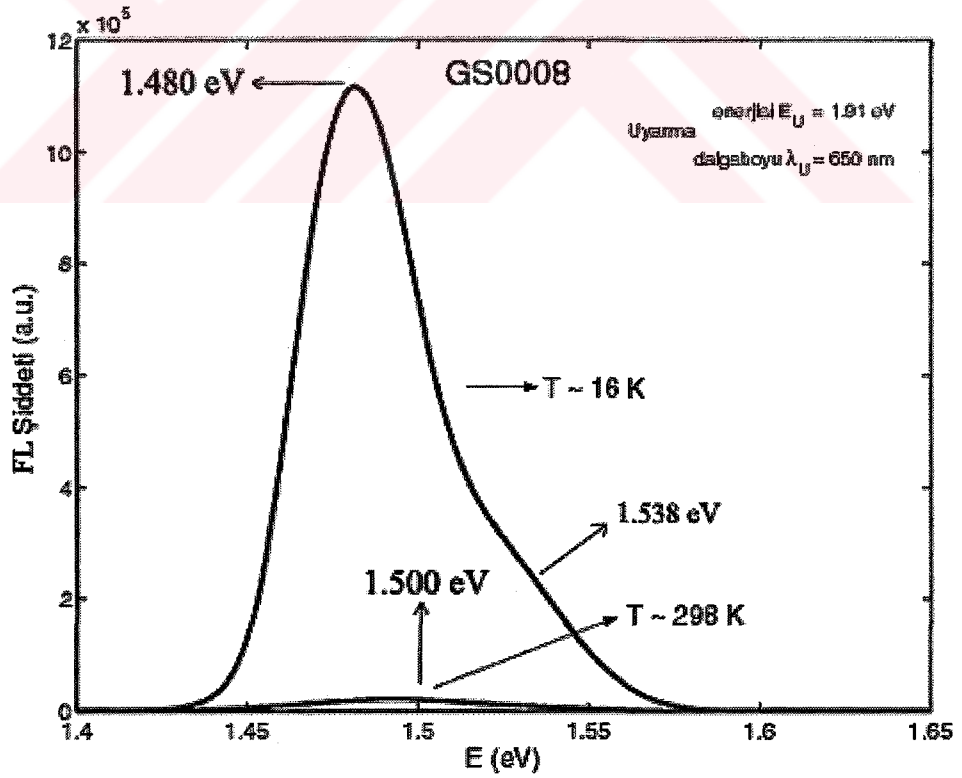
Şekil 4.1: Kod ismi GS0008 olan yarıiletken yapının amaçlanan yapı grafiği.

GS0008 kod isimli yapı tekli kuantum kuyusuna sahiptir. Şekil 4.1'de büyütülmesi amaçlanan yapının çizimi gösterilmiştir. GS0008 yapısının sahip olduğu kuyunun optiksel özellikleri fotoluminesans aygıtı kullanılarak incelenmiştir. Ölçümler yapıldığı sırada fotoluminesans aygıtı kurulum aşamasındaydı yani asıl güçlü lazer daha yerleştirilmemişti. Bu sebepten dolayı fotoluminesans ölçülerinde kısıtlı kalmıştır. Yalnızca belirli sıcaklıklarda ölçümler yapılabilmektedir.

Büyüttüğümüz yapının ne derece istediğimiz doğrultusunda büyüdüğünün öğrenilmesi için elipsometri kullanılmıştır. Elipsometriden elde edilen grafikten yararlanarak bilgisayar ortamında bir yapı oluşturulabilir. Bu sayede elde edilen model yapı aslında büyüyen yapıdır. Bur tezdeki elipsometri ve fotoluminesans ölçümleri Gazi Üniversitesi STARLAB'da yapılmıştır.

#### 4.2 Fotoluminesans Sonuçları

Bölüm 3'de bahsedildiği gibi fotoluminesans spektroskopisi yarıiletken yapıların karakterizasyonu için güçlü bir optiksel metottur. Fotoluminesans silikon ve III-V gurubu yarıiletken elementlerdeki safsızlık ve kusurları bulmak için kullanılabilir. Fotoluminesans optiksel özellik taşıdığı için yarıiletkenlerdeki bant aralığını belirlemede de kullanılır [15].



Şekil 4.2: GS0008 yapısının 16 K ve 298 K'deki sıcaklıklarda elde edilmiş fotoluminesans sonuçları.

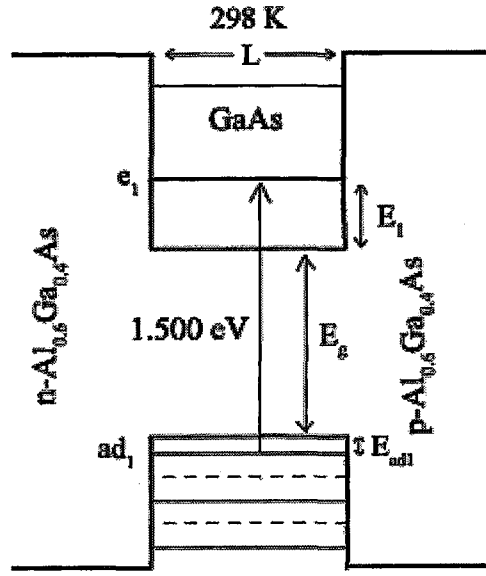
Fotoluminsans ölçümü yapılan GS0008 kod isimli yapının amaçlanan yapısının çizimi şekil 4.1'deki gibidir. Şekilden de anlaşılacağı gibi amaçlanan yapının kuantum kuyu genişliği 5 nm'dir.

Ölçümler 16K ve 298K sıcaklıklarında yapılmıştır. Kullanılan ışık 1.91 eV enerjiye ve 650 nm dalga boyuna sahiptir. Şekil 4.2'de 16 K ve 298 K sıcaklıklarında yapılan ölçümler bir araya getirilmiştir. Grafiğe bakılırsa 16 K sıcaklığında 1.480 eV ve 1.538 eV enerjili pikler görülebilir. 1.480 eV enerjili pik değerine göre daha belirgin olsa da aslında bu pik yapıdaki kusurlardan kaynaklanmıştır. 16 K sıcaklığında yapılan ölçümün grafiğinde görülen diğer pik olan 1.538 eV değerli pik ise kuantum kuyusundaki ilk elektron alt bandı ( $E_1$ ) ile ilk ağır deşik alt bandı ( $E_{ad1}$ ) arasındaki enerji aralığıdır. 298 K'de yapılan ölçümde ise 1.500 eV değerine sahip pik elde edilmiştir. Bu pik 298 K'de kuantum kuyusunda bulunan  $E_1$  ve  $E_{ad1}$  alt bantları arasındaki enerji farkını göstermiştir.

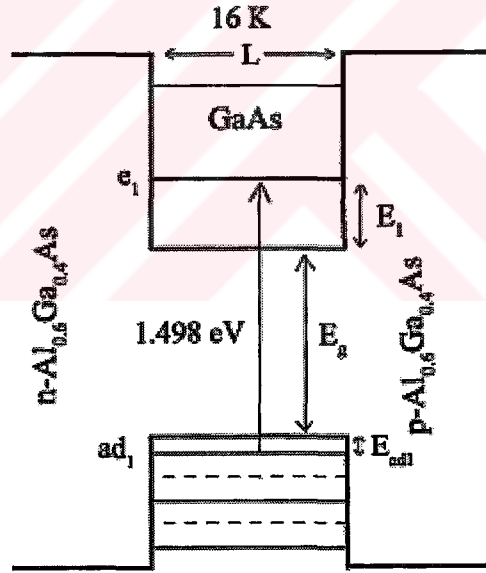
Bu sonuçların teorik hesaplamalarla uyum içinde olup olmadığını anlamak için potansiyel kuyu içerisindeki enerji seviyelerini veren (4.1) denklemi kullanılmıştır. Teorik sonuçlar 298 K'de yapılan ölçümden elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır.

$$E_n = \frac{n^2 \pi^2 \hbar^2}{2m^* L^2} \quad (4.1)$$

298 K, 300 K'ne yakın bir değerdir. Bu yüzden hesaplamalarda 300 K de GaAs içerisindeki elektronun ve ağır deşğin etkin kütleleri kullanılmıştır. 300 k'da  $m_e^*/m_0 = 0.067$  ve  $m_{ad}^*/m_0 = 0.48$ 'dir. GaAs'ğin 300 K'da sahip olduğu bant aralığı 300 K'de 1.43 eV'tur [3].



(a)



(b)

Şekil 4.3: GS0008 yapısının fotoluminesans sonucuna göre kuantum kuyusunun grafik gösterimi. (a) 298K'de alınan sonuca göre, (b) 16K'de alınan sonuca göre çizilen şekildir.

$$E_1 = \frac{1^2 (3.14)^2 (1.054 \times 10^{-34})^2}{2(0.067 \times 9.1 \times 10^{-31})(5 \times 10^{-9})} (6.242 \times 10^{18}) = 0.224 eV$$

$$E_{ad1} = \frac{1^2 (3.14)^2 (1.054 \times 10^{-34})^2}{2(0.48 \times 9.1 \times 10^{-31})(5 \times 10^{-9})} (6.242 \times 10^{18}) = 0.031 eV$$

$$E_1 \rightarrow E_{ad1} = E_1 + E_{ad1} + E_g = 0.224 + 0.031 + 1.43 = 1.685 eV$$

Sonuçtan da anlaşılacağı gibi 5 nm genişliğindeki kuyunun deneysel sonucu ile teorik sonucu uyuşmamıştır. Bu sonuç kuyunun amaçlanan 5 nm genişliğinde büyümediğini göstermiştir. Hesaplamalar 9.5 nm genişliğindeki kuyu için tekrar edildiğinde,

$$E_1 = \frac{1^2 (3.14)^2 (1.054 \times 10^{-34})^2}{2(0.067 \times 9.1 \times 10^{-31})(9.5 \times 10^{-9})} (6.242 \times 10^{18}) = 0.062 eV$$

$$E_{ad1} = \frac{1^2 (3.14)^2 (1.054 \times 10^{-34})^2}{2(0.48 \times 9.1 \times 10^{-31})(9.5 \times 10^{-9})} (6.242 \times 10^{18}) = 0.0086 eV$$

$$E_1 \rightarrow E_{ad1} = E_1 + E_{ad1} + E_g = 0.062 + 0.0086 + 1.43 = 1.506 eV$$

sonucu bulunmuştur. 9.5 nm genişliğine göre bulunan sonuçlar ile deneysel sonuçlar uyuşmaktadır. Bu sonuca dayanarak yapı tam olarak 9.5 nm genişliğinde kuantum kuyusuna sahiptir diyemeyiz fakat bu sonuca dayanarak kuantum kuyusunun genişliğinin 9.5 nm değerine yakın olduğunu söyleyebiliriz. Sonuç olarak, sonuçlar değerlendirildiğinde yapının 5 nm değil de 9.5 nm genişliğindeki kuantum kuyusuna sahip olduğu bulunmuştur. GS0008 kod isimli yapı deneme amaçlı büyütülmüştür. Fotoluminesans sonuçlarından anlaşıldığı gibi yapıda bozukluklar vardır.

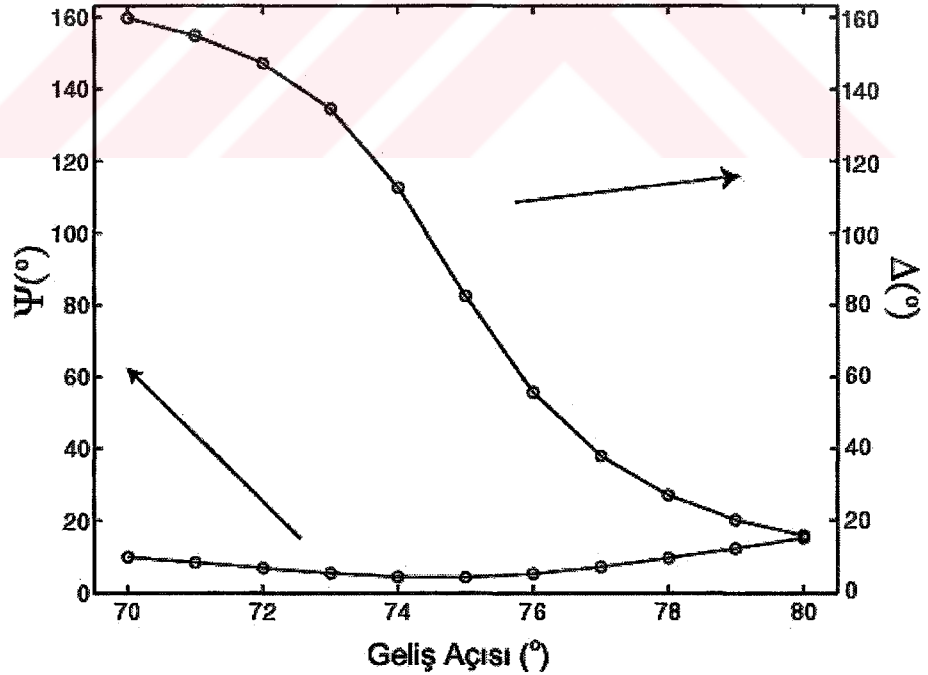
Şekil 4.2'de görüldüğü gibi 16 K'de ilk elektron alt bandı ile ilk ağır deşik alt bandı arasındaki geçiş 1.538 eV, 298 K'deki ise 1.500 eV'dir. Bu azalmanın sebebi sıcaklık arttığında bant aralığının azalmasıdır [3].

### 4.3 Elipsometri Sonuçları

Elipsometrik ölçümlerde STARLAB'da bulunan 190 ile 2100 nm arasındaki spektral alana sahip olan Horriba Jobin Yvon'un UVISEL modeli kullanılmıştır.

Yansıyan veya geçen ışığın polarizasyon durumunun belirlenmesi ile kullanılan malzemenin optik parametreleri belirlenebilir [18]. Bu yapının özelliğine bağlıdır ve bu parametrelerin ölçümü sonucunda oluşan grafik yapıya özgüdür. Yani elde ettiğimiz grafikte ölçümünü yaptığımız yapının ne derece istediğimiz yapı olduğunu anlayabiliriz.

Elipsometri ile GS0008 modelinin ölçümlerine 950 nm dalga boyunda 70'ten 80'e kadar 10'ar derecelik değişen açılarla ölçüm yaparak başlanmıştır. Bunun sebebi yapımızın hangi açılara daha duyarlı olduğunu öğrenmektir. Ölçüm sonucunda aldığımız veriler şekil 4.4'teki gibi grafik haline getirilmiştir.

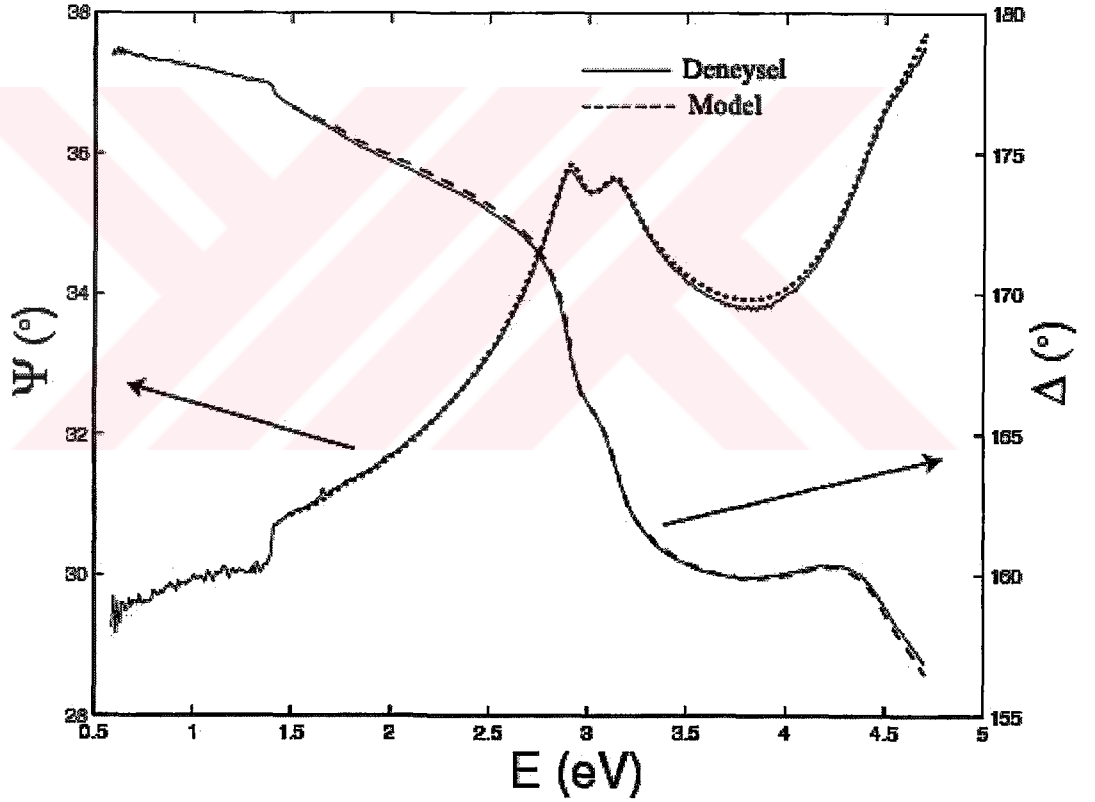


Şekil 4.4: 950 nm dalga boyunda 70 ile 80 derece arasında 10'ar dereceyle değişen açılardan elde edilen verilerin grafiği.



Eğer şekil 4.4’de bakılırsa grafikteki en yoğun değişimin 73 ile 79 dereceler arasında olduğu görülebilir. Buna dayanarak ölçümleri 73, 76 ve 79 derecelerde yapılmasına karar verilmiştir.

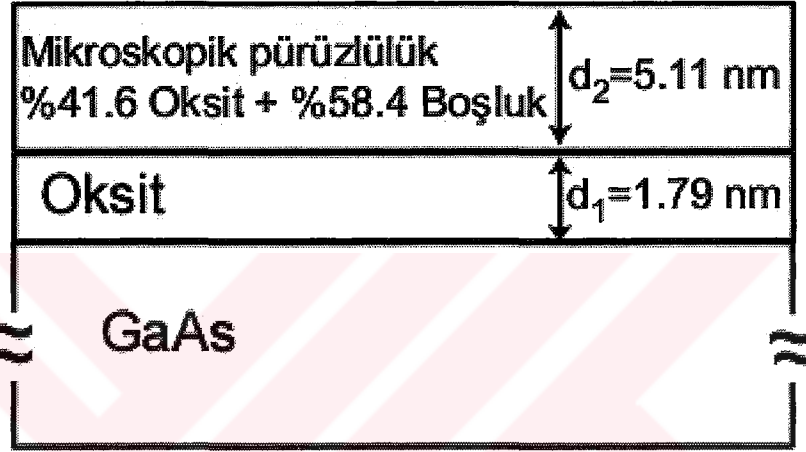
İlk olarak alttaşın elipsometrik grafiğini çizdik bunun amacı GS0008 yapısının grafiğini incelerken kullanmaktır. Alttaşın ölçümü GS0008 yapısının en dış bölgesinden yapılmıştır çünkü bu kısmın üzerini büyütme sırasında tutucu kapatır dolayısıyla bu bölgede büyüme olmaz. Bu bölgedeki ölçüm 50 derecede yapılmıştır. Ölçümden elde ettiğimiz grafik şekil 4.5’te görülüyor.



Şekil 4.5: Alttaştan elde edilen  $\Psi$ ,  $\Delta$  grafiği vedeneysel ve model grafiğın biri birine göre durumu.

Elipsometri ölçümünde önce yapımıza yakın basit bir model oluşturulmuştur. Daha sonra bu model üzerindeki parametreler değiştirilerek deneysel grafiğe yakın bir grafik veren model oluşturulmuştur.

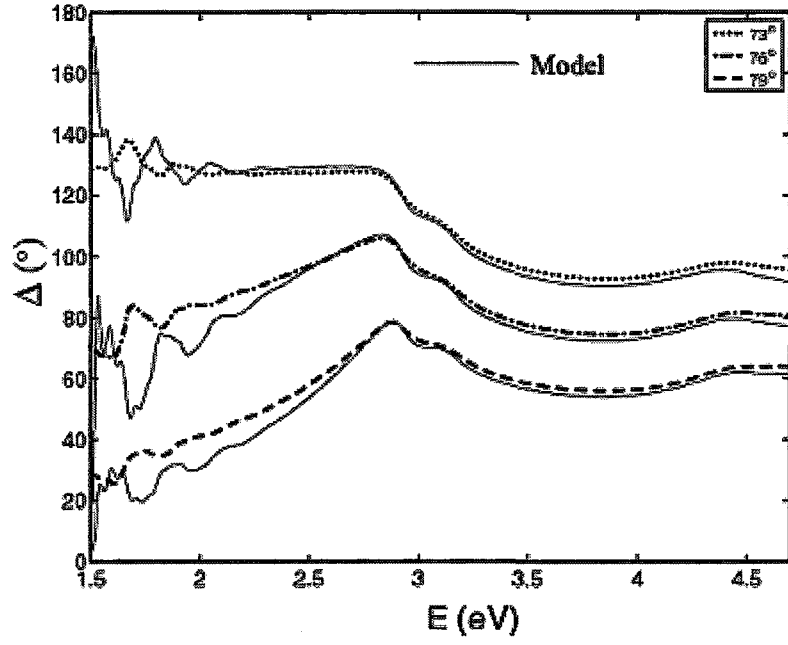
Deneysel grafik ve modelimizin grafiği şekil 4.5'tede görüldüğü gibi biri birine oldukça uyumludur. Elde ettiğimiz modelin yapısı şekil 4.6'da görülmüyor.



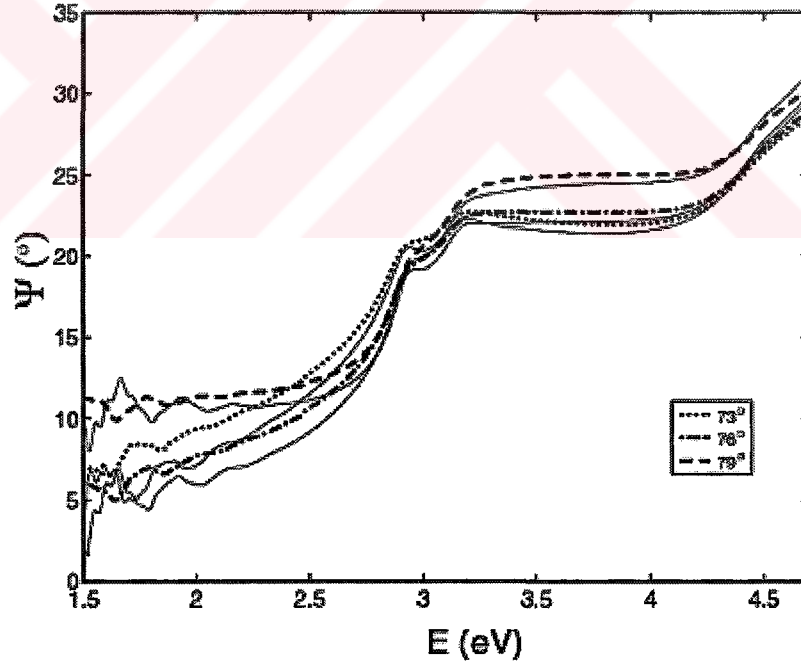
Şekil 4.6: Elipsometri ölçümünde elde ettiğimiz sonuçlara göre oluşan model yapı.

Gerçektende büyütme GaAs alttaş üzerine yapılmıştır. Şekilde GaAs üzerinde 1.79 nm kalınlığında oksit tabakası ve onunda üzerinde 5.11 nm kalınlığında pürüzlülük görülmüyor. Bu beklenen bir süreçtir çünkü havayla temas eden yapının üstü bir süre sonra oksit tabakasıyla kaplanır ve doğal olarak geçek malzeme mikroskobik pürüzlülüğe sahiptir.

Bir sonraki aşamada GS0008 yapısının ölçümlerine başlanmıştır. Ölçümlerde daha önce belirlediğimiz açılar olan 73, 76 ve 79 derecelik açılarını kullanılmıştır. Sonuçta şekil 4.7 ve 4.8 grafikleri elde edilmiştir.



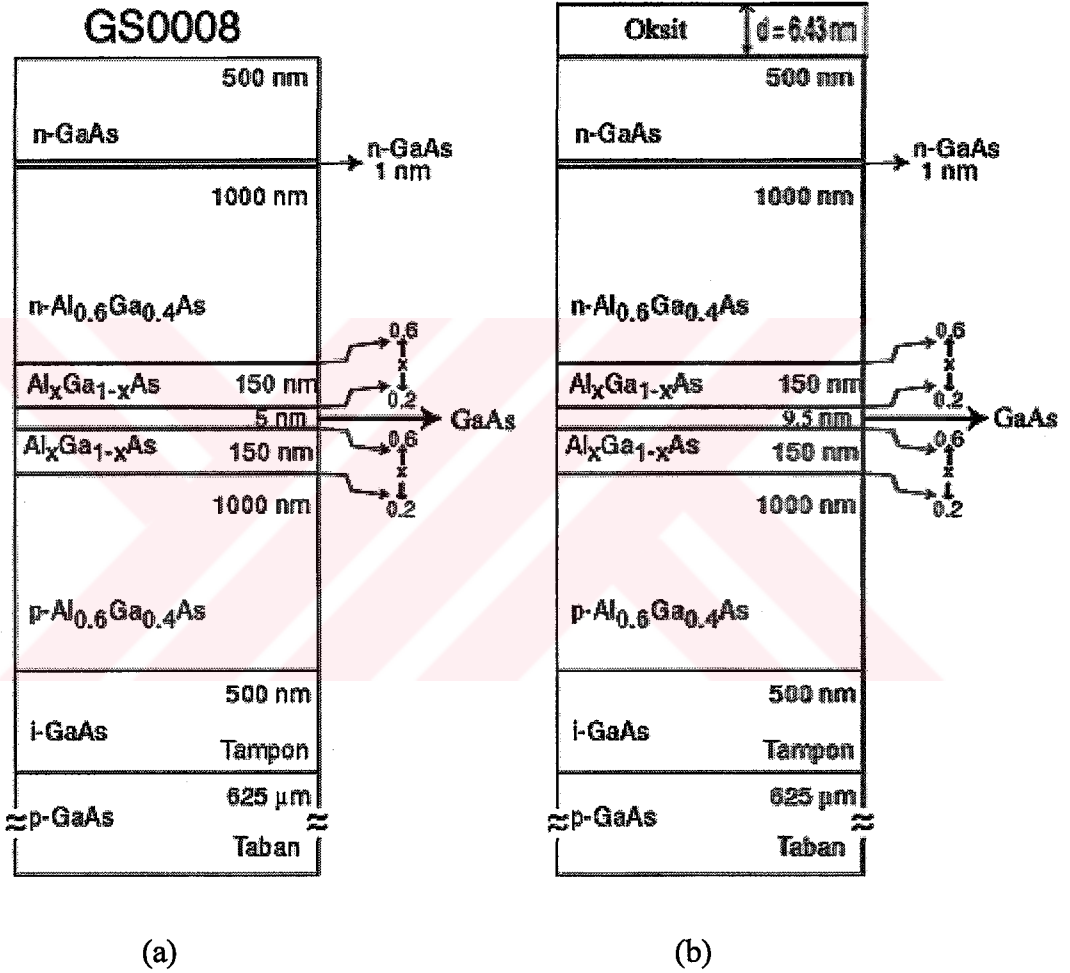
Şekil 4.7:  $\Delta$  parametresine göre model grafik ile deneysel grafiğin biri birine göre durumu.



Şekil 4.8 :  $\Psi$  parametresine göre model ve deneysel grafiğin biri birine göre durumu.

Şekil 4.7 ve 4.8 önce deneysel olarak elde edilmiştir ve daha sonra modeller oluşturulmuştur. Sonuçta deneysel grafiğe en yakın grafiği veren yapı bulunmuştur.

Grafikte bazı yerler de uyumsuzluklar var bu en üst tabaka olan GaAs tabakasının kalın olmasından kaynaklanıyor. Bu kalınlık ışığın polarizasyonunu olumsuz etkiliyor. Bunun yanında, doğal kusurlar, oksit tabakası ve yapıdaki bozukluklar grafiği etkileyen unsurlar içerisindedir. Oluşturduğumuz model şekil 4.9b'de görülüyor.



Şekil 4.9: (a) amaçlanan yapı (b) bilgisayar ortamında elde edilen model.

Oluşturduğumuz model, yapının grafiğine en yakın grafiği veren modeldir. Model grafiği ile gerçek yapının grafiği arasında uyumsuzluklar giderilememiştir. Çünkü yapıda bozukluklar vardır bu tam uyumlu grafiğin oluşmasına engel olmuştur. Model grafiğine dikkat edilirse yapının üzerinde 6.43 nm kalınlığında oksit tabakası olduğu görülebilir. Bu oksitlenme doğal bir süreçtir.

## 5. SONUÇ

Bu tezde Moleküler Demet Epitaksi tekniğiyle üretilen  $Al_{0.6}Ga_{0.4}As/GaAs$  yarıiletken yapısı incelenmiştir. İncelemede fotolüminesans ve elipsometri teknikleri kullanılmıştır.

Fotolüminesans sonuçlarına göre üretilen yapının amaçlanan 5 nm genişliğindeki kuantum kuyusuna değil de 9.5 nm genişliğindeki kuantum kuyusuna sahip olduğu bulunmuştur. Yapının üretildiği sistem yeni bir sistemdir ve bu yapı deneme amaçlı üretilen bir yapıdır. Bu deneme sistemdeki hataları bulma amaçlıdır. Yapı 298K'de 1.500 eV, 16K'de 1.538 eV' enerji farkına sahip birinci elektron alt bandı ( $E_1$ ) ve ağır deşik alt bandına ( $E_{ad1}$ ) sahiptir. Sıcaklık farkından dolayı bant aralığının azalması bilinen bir süreçtir. Bu azalma enerji farkını azaltacaktır.

Fotolüminesans sonucundan elde ettiğimiz bu sonuçlar yapımızın özellikle optiksel özelliğini öğrenmemizi sağlamıştır. Sonuçlar, yapıda hatalar olmasına rağmen yapının optiksel bir araç olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Uygun devre kurulup yapıya akım uygularsak lazer elde edebiliriz yada üzerine ışık düşürülürse uyarılmadan dolayı elektrik akımı elde edebiliriz. Bunları fotolüminesans sonuçlarına dayanarak söyleyebiliyoruz.

Elipsometri aygıtından aldığımız grafiklerle bilgisayar ortamında oluşturduğumuz modelin elipsometrik parametrelere göre grafiği olan  $\Psi$  ve  $\Delta$  grafikleri genelde uyum içerisindedir. Grafiklerdeki uyumsuzluklar; en üst tabakada bulunan kalın GaAs tabakası, oksit tabakası ve yapıdaki büyüme sırasında oluşan bozukluklardan kaynaklanmıştır. Sonuçta model büyüyen yapıyı göstermiştir. Modelin kuantum kuyusunun genişliği fotolüminesans sonuçlarını destekliyor. 6.43 nm kalınlığındaki oksit tabakası yapının havayla temas ettiğini göstermiştir.

DeneySEL sonuçların yorumlanması sonucunda elde edilen bilgiler büyütme istediğimiz yapıyla büyüyen yapı arasında farklılıklar olduğunu göstermiştir. Daha önce de belirtildiği gibi bu yapı deneme amaçlı üretilen bir yapıdır. Yapı Sistem hakkında bilgi edinmek amacıyla büyütülmüştür. Bu yapı Türkiye'de moleküler demet epitaksi tekniğiyle üretilen ilk kuantum kuyulu yarıiletken yapılar arasında olması sebebiyle önemlidir

## 6. KAYNAKLAR

- [1] Parker G., "Introductory Semiconductor Device Physics", Prentice Hall, London, 1994
- [2] Wilson J., Hawkes J. F. B., "Optoelectronics", Türkçesi Okur İ., Değişim Yayınları, Adapazarı, 2000
- [3] Kittel C., Introduction to Solid State Physics, Türkçesi Karaoğlu B., Güven Yayıncılık, İstanbul, 1996.
- [4] Hawkes J.F.B., Wilson J, 'Optoelectronics', Prentice Hall, Second Edition, NY, 1985
- [5] Morgan D. V., Moses A. J. , "III-V Quantum System Research", Peter Peregrinus ltd, London, 1995
- [6] SINGLETON J. , "bant Theory and Electronic Properties of Solids", Oxford University Press, Great Britain, 2003.
- [7] [http://www.veeco.com/learning/learning\\_lattice.asp](http://www.veeco.com/learning/learning_lattice.asp)
- [8] <http://www.istanbul.edu.tr/fen/fizik/ssp/calismakonulari/lds/lds.htm>
- [9] Biasiol G. , Sorba L. , "Molecular Beam Epitaxy: Principles and Applications", Eds, Edizioni ETS, Pisa, 2001
- [10] Foxon C. T., Joice B.A., "in Growth and Characterisation of Semiconductors", Eds. Stradling R. A. ve Klipstein P.C. , IOP yayınlama, 1990, s. 35.
- [12] Herman M. A., Sitter H. , "Molecular Beam Epitaxy", Springer-Verlag, Berlin, 1996.

- [13] Foord J. S. , “Chemical Beam Epitaxy and Related Techniques”, John Wiley & Son Ltd,1997.
- [14] Ohring M. , “The Material science of Thin Films”, Academic Press, 1992.
- [15] [http://www.jobinyvon.com/usadivisions/OSD/applications/104\\_PL\\_of\\_Semiconductors.pdf](http://www.jobinyvon.com/usadivisions/OSD/applications/104_PL_of_Semiconductors.pdf)
- [16] Bayrak S.T.,  $Al_xGa_{1-x}N/GaN$  2-Boyutlu Elektron Gazının Elektriksel ve Optiksel özellikleri Arasındaki İlişkinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2003.
- [17] Teke A. , Hot Electron Light Emission In  $GaAs/Al_xGa_{1-x}As$  Heterostructures, Doktora tezi, University of Essex, UK, 1997.
- [18] <http://www.istanbul.edu.tr/fen/fizik/ssp/calismakonulari/lds/elipsome>
- [19] [http://www.jawoollam.com/Tutorial\\_6.html](http://www.jawoollam.com/Tutorial_6.html)
- [20] Sadeghi S. M., Meyer J., Tiedje T., Beaudoin M, Multilevel Infrared Coupling of Excitons in Quantum-Well Semiconductors, IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 36, No. 11, 2000.