



**SEYRELTİK AZOTLU p-n EKLEM YAPILARININ MBE TEKNİĞİ İLE  
BÜYÜTÜLMESİ ve KARAKTERİZASYONU**

**Tunç SERTEL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
FİZİK ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2016**

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Tunç SERTEL

06 / 06 / 2016

# SEYRELTİK AZOTLU p-n EKLEM YAPILARININ MBE TEKNİĞİ İLE BÜYÜTÜLMESİ ve KARAKTERİZASYONU

(Yüksek Lisans Tezi)

Tunç SERTEL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2016

## ÖZET

Bu tez çalışmasında, Si ve GaP alttaşlar üzerine seyreltik azotlu GaPN ve GaAsPN yarıiletken p-n eklem yapıları Moleküler Demet Epitaksi (MBE) tekniği ile büyütüldü. Büyütülen numunelerin yapısal, elektriksel ve optik özellikleri incelendi. Bu amaçla ilk olarak, seyreltik azotlu yarıiletkenlerde taşıyıcı yoğunluklarının belirlenmesi için katkı kalibrasyon numuneleri büyütüldü. Ardından, Si alttaş üzerine GaP tabakasının yüksek kristal kalitesinde büyütülebilmesi için farklı yöntemler denendi ve uygun büyütme yöntemi belirlendi. GaP alttaş üzerine p-n eklem GaPN ve GaAsPN, Si alttaş üzerine p-n eklem GaAsPN yapıları büyütüldü. Büyütülen numunelerin elektriksel özellikleri Hall etkisi, optik özellikleri fotoluminesans (PL) ve yapısal özellikleri ise yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı (HRXRD) ölçümleri ile belirlendi. GaP/Si büyütmelerinde, [110] doğrultusu boyunca 4° açı ile kesilmiş Si (100) alttaş, MEE (Migration Enhanced Epitaxy) tekniği ve iç tavlama süreçlerinin birlikte kullanılmasının kaliteli kristal büyütmenin önemli etkenleri olduğu sonucuna varıldı. HRXRD kırınım desenleri LEPTOS programı ile simüle edilerek, seyreltik azotlu yarıiletkenlerdeki alaşım oranları belirlendi. BAC modeli kullanılarak bant enerjileri teorik olarak hesaplandı ve PL spektrumları ile kıyaslandı. Yapılan analizler sonucunda,  $6 \times 10^{17}$ - $2 \times 10^{18}$  cm<sup>-3</sup> aralığında n ve p tipi katkı yoğunluğuna sahip, yaklaşık %0,3-%0,8 oranında azot içeren seyreltik azotlu yarıiletken katmanların büyütülmesinin başarıldığı belirlendi. Son olarak, Si ve GaP alttaşlar üzerine büyütülen p-n eklem yapıların diyot fabrikasyonları yapıldı. Elde edilen aygıtların akım-gerilim (I-V) ölçümleri alındı. Diyot karakteristiği sergileyen seyreltik azotlu p-n eklem aygıtların, aygıt çıktı parametreleri hesaplandı. Elde edilen sonuçlar, büyütülen seyreltik azotlu yapıların ışık yayan diyot (LED) üretimi için uygun olduğunu göstermektedir.

Bilim Kodu : 20227

Anahtar Kelimeler : Seyreltik azot, p-n eklem, GaPN, GaAsPN, MBE

Sayfa Adedi : 80

Danışman : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

DILUTE NITRIDE p-n JUNCTIONS GROWN BY MBE TECHNIQUE  
AND THEIR CHARACTERIZATIONS

(M. Sc. Thesis)

Tunç SERTEL

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2016

ABSTRACT

In this thesis, dilute nitride GaPN and GaAsPN semiconductor p-n junction structures were grown on Si and GaP substrates by MBE technique. The structural, electrical and optical properties of the samples which were grown have been investigated. For this purpose, firstly, dopant-calibration samples were grown to determine the carrier concentrations in the dilute nitride semiconductors. Several methods, then, were tried so that the high quality GaP layer on Si substrate was grown and the proper growth method was classified. The structures of p-n junction GaPN and the GaAsPN on GaP substrate and p-n junction GaAsPN on Si substrate were grown. The electrical, optical and structural properties of samples were obtained by using Hall Effect, Photoluminescence (PL) and High Resolution X-Ray Diffraction (HRXRD) measurements, respectively. It was concluded that the high quality GaP/Si crystals can be grown provided that the Si (100) substrate misoriented by 4° toward [110] direction, Migration Enhanced Epitaxy (MEE) and annealing phases were used together. HRXRD patterns were simulated by using LEPTOS programme and alloy compositions in dilute nitride semiconductors were determined. The band gaps were theoretically calculated by using BAC model and compared with PL spectrums. As a result of this measurements, it was determined that the growth of dilute nitride semiconductor layers having n and p-type carrier concentration between  $6 \times 10^{17}$ - $2 \times 10^{18}$  cm<sup>-3</sup> and containing approximately nitrogen composition of 0,3%-0,8% was achieved. Finally, diode fabrications of the p-n junction structures grown on Si and GaP substrates were completed. I-V measurements of the devices were carried out. Device parameters of the dilute nitride p-n junction devices performing diode characteristic were calculated. The results obtained show that the dilute nitride structures grown are suitable for the manufacturing of light emitting diode (LED).

Science Code : 20227

Key Words : Dilute nitride, p-n junction, GaPN, GaAsPN, MBE

Page Number : 80

Supervisor : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

## TEŞEKKÜR

Öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, her zaman yanımda olan canım aileme sonsuz teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca bana her türlü imkanı sağlayan, yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, önderliğiyle yolumu aydınlatan, engin bilgilerinden faydalandığım Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi Müdürü, değerli danışman hocam Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e,

Yürütücülüğü yaptığı proje ile bu tezin oluşmasında büyük emeği ve katkısı olan, bilgi ve yardımlarını asla eksik etmeyip deneyimlerini bize aktaran, çok değerli Doç. Dr. Saime Şebnem ÇETİN hocama,

Tezin her aşamasında emeğini, bilgisini, deneyimini ve sabrını eksik etmeyen, bize her konuda önderlik edip yol gösteren çok kıymetli hocam Uzm. Dr. Tarık ASAR'a,

Çalışmalarım esnasında yardımlarıyla beni destekleyen ve hiçbir zaman yalnız bırakmayan, birlikte güzel işlere imza attığımız Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi çalışanlarının her birine,

Tüm destek, emek ve sevgileri için şükran dolusu teşekkürü borç bilirim.

Tez çalışmamı, 2011K120290 nolu “Fotonik Araştırma Merkezi” isimli proje ile destekleyen Kalkınma Bakanlığı'na ve 114F224 nolu “Seyreltik Azotlu Yapıların Epitaksiyel Büyütme Mekanizmaları ve LED Aygıt Fabrikasyonu” isimli proje ile destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

|                                                            | Sayfa |
|------------------------------------------------------------|-------|
| ÖZET .....                                                 | iv    |
| ABSTRACT.....                                              | v     |
| TEŞEKKÜR.....                                              | vi    |
| İÇİNDEKİLER .....                                          | vii   |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....                                  | x     |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....                                   | xi    |
| RESİMLERİN LİSTESİ .....                                   | xiii  |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....                               | xiv   |
| 1. GİRİŞ.....                                              | 1     |
| 2. GENEL BİLGİLER .....                                    | 5     |
| 2.1. Yarıiletken Malzemeler.....                           | 5     |
| 2.1.1. n-tipi yarıiletkenler .....                         | 7     |
| 2.1.2. p-tipi yarıiletkenler .....                         | 8     |
| 2.2. Yarıiletken p-n Eklem Yapılar .....                   | 9     |
| 2.3. Çoklu Yarıiletken Yapılar .....                       | 12    |
| 2.4. Seyretilik Azotlu Yarıiletkenler .....                | 13    |
| 2.4.1. Bant zıt-geçiş (Band Anticrossing, BAC) modeli..... | 16    |
| 2.5. GaP Yarıiletken Bileşiği .....                        | 18    |
| 2.6. Seyretilik Azotlu GaPN Yarıiletken Alaşımı .....      | 18    |
| 2.7. Seyretilik Azotlu GaAsPN Yarıiletken Alaşımı.....     | 20    |
| 2.8. Si Alttaş Üzerine GaP Büyütülmesi .....               | 21    |
| 3. BÜYÜTME ve KARAKTERİZASYON TEKNİKLERİ .....             | 23    |
| 3.1. Büyütme Teknikleri .....                              | 23    |

|                                                                                       | <b>Sayfa</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 3.1.1. Moleküler demet epitaksi (MBE) sistemi .....                                   | 23           |
| 3.2. Yapıların Karakterizasyonları .....                                              | 26           |
| 3.2.1. Yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı (HRXRD).....                              | 26           |
| 3.2.2. Hall etkisi ölçüm sistemi.....                                                 | 28           |
| 3.2.3. Fotoluminesans (PL) .....                                                      | 30           |
| 3.3. Diyot Fabrikasyonu.....                                                          | 32           |
| 3.3.1. Vakum-buharlaştırma (Evaporasyon) sistemi.....                                 | 32           |
| 3.3.2. Püskürtme (Sputtering) sistemi.....                                            | 33           |
| 3.3.3. Hızlı ısıtma (RTA) sistemi .....                                               | 34           |
| 3.3.4. Akım-Gerilim (I-V) ölçüm sistemi .....                                         | 34           |
| <b>4. YAPILARIN BÜYÜTÜLMESİ ve KARAKTERİZASYONLARI:<br/>BULGULAR ve TARTIŞMA.....</b> | 37           |
| 4.1. Yapıların Büyütülmesi .....                                                      | 37           |
| 4.1.1. Katkı kalibrasyon numunelerinin büyütülmesi .....                              | 37           |
| 4.1.2. p-n eklem GaPN ve GaAsPN numunelerinin büyütülmesi.....                        | 41           |
| 4.1.3. GaP/Si kalibrasyon numunelerinin büyütülmesi.....                              | 45           |
| 4.1.4. p-n eklem GaAsPN yapısının Si ve GaP alttaşlar üzerine büyütülmesi....         | 49           |
| 4.2. Yapıların Karakterizasyonları .....                                              | 53           |
| 4.2.1. Hall etkisi analizleri .....                                                   | 53           |
| 4.2.2. Yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı (HRXRD) analizleri.....                   | 54           |
| 4.2.3. Fotoluminesans (PL) ölçümlerinin analizi .....                                 | 57           |
| 4.3. Diyot Fabrikasyonu ve Akım-Gerilim (I-V) Ölçümleri.....                          | 61           |
| 4.3.1. Diyot fabrikasyonu.....                                                        | 61           |
| 4.3.2. Akım-Gerilim (I-V) ölçümleri .....                                             | 65           |
| <b>5. SONUÇLAR.....</b>                                                               | 69           |

**Sayfa**

KAYNAKLAR ..... 73

ÖZGEÇMİŞ ..... 79

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge                                                                        | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 2.1. II-VI grupları arasında kalan elementler.....                     | 5     |
| Çizelge 2.2. IIIA ve VA grubu elementlerinin bazı fiziksel özellikleri.....    | 15    |
| Çizelge 2.3. GaP'ın oda sıcaklığında bazı özellikleri .....                    | 18    |
| Çizelge 4.1. GS289 numunesinin büyütme parametreleri .....                     | 39    |
| Çizelge 4.2. GS293 numunesinin büyütme parametreleri .....                     | 40    |
| Çizelge 4.3. GS295 numunesinin büyütme parametreleri .....                     | 43    |
| Çizelge 4.4. GS298 numunesinin büyütme parametreleri .....                     | 44    |
| Çizelge 4.5. GS300 numunesinin büyütme parametreleri .....                     | 47    |
| Çizelge 4.6. GS301 numunesinin büyütme parametreleri .....                     | 48    |
| Çizelge 4.7. GS303 numunesinin büyütme parametreleri .....                     | 51    |
| Çizelge 4.8. GS304 numunesinin büyütme parametreleri .....                     | 52    |
| Çizelge 4.9. Numunelerin Hall etkisi ölçüm sonuçları .....                     | 53    |
| Çizelge 4.10. GS295 ve GS298 numunelerinin alaşım oranları .....               | 55    |
| Çizelge 4.11. GS303 ve GS304 numunelerinin alaşım oranları .....               | 57    |
| Çizelge 4.12. GS295 ve GS298 numunelerinin PL ve BAC sonuçlarının kıyaslanması | 59    |
| Çizelge 4.13. GS303 ve GS304 numunelerinin PL ve BAC sonuçlarının kıyaslanması | 61    |
| Çizelge 4.14. Ön ve arka yüzey Au kaplama parametreleri .....                  | 63    |
| Çizelge 4.15. Ön ve arka yüzey AuNiGe kaplama parametreleri.....               | 63    |
| Çizelge 4.16. GS295 ve GS298 numunelerinin tavlama parametreleri .....         | 64    |
| Çizelge 4.17. Ön yüzey AuZn, arka yüzey AuNiGe kaplama parametreleri.....      | 65    |
| Çizelge 4.18. GS303 ve GS304 numunelerinin tavlama parametreleri .....         | 65    |

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil                                                                                                                                    | Sayfa |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.1. Metal, yalıtkan ve yarıiletkenlerde bant yapıları .....                                                                       | 6     |
| Şekil 2.2. Katkılı ve katkısız yarıiletkenlerde fermi seviyesinin konumları.....                                                         | 7     |
| Şekil 2.3. (a) Silikon kristalinde verici atom safsızlığı, (b) n-tipi yarıiletkende verici ( $E_d$ ) ve fermi ( $E_F$ ) seviyeleri ..... | 8     |
| Şekil 2.4. (a) Silikon kristalinde alıcı atom safsızlığı, (b) p-tipi yarıiletkende alıcı ( $E_a$ ) ve fermi ( $E_F$ ) seviyeleri.....    | 9     |
| Şekil 2.5. Eklem oluşumunda yük taşıyıcılarının hareketi ve enerji-bant diyagramı ...                                                    | 10    |
| Şekil 2.6. Doğru beslemde p-n eklem.....                                                                                                 | 11    |
| Şekil 2.7. (a) Aynı tür eklem, (b) Farklı tür eklem .....                                                                                | 11    |
| Şekil 2.8. Yarıiletkenlerin örgü sabiti-bant aralığı diyagramı .....                                                                     | 12    |
| Şekil 2.9. Seyreltik azotlu GaAsN yarıiletkeninde azot oranı-bant aralığı ilişkisi.....                                                  | 14    |
| Şekil 2.10. Bazı seyreltik azotlu yarıiletkenlerin örgü sabiti-bant aralığı diyagramı .....                                              | 16    |
| Şekil 2.11. Seyreltik azotlu GaAsN yarıiletkeninin enerji-bant yapısı.....                                                               | 17    |
| Şekil 2.12. GaP yarıiletkeninin kristal yapısı.....                                                                                      | 18    |
| Şekil 2.13. GaPN yarıiletken alaşımının kristal yapısı .....                                                                             | 19    |
| Şekil 2.14. Seyreltik azotlu GaPN alaşımında azot oranı-bant aralığı ilişkisi.....                                                       | 19    |
| Şekil 2.15. GaAsPN yarıiletken alaşımının kristal yapısı.....                                                                            | 20    |
| Şekil 2.16. GaP/Si büyütmesinde AFB oluşumu .....                                                                                        | 21    |
| Şekil 3.1. MBE tekniğinin şematik gösterimi.....                                                                                         | 23    |
| Şekil 3.2. VG-Semicon V80H-MBE sisteminin şematik gösterimi .....                                                                        | 25    |
| Şekil 3.3. Kristal düzlemlerinden X-ışınlarının saçılması .....                                                                          | 27    |
| Şekil 3.4. Yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınım düzeneği.....                                                                             | 27    |
| Şekil 3.5. Fotoluminesans (PL) ölçümü için tipik bir deneysel düzenek.....                                                               | 30    |

| Şekil                                                                                                                                                                            | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 3.6. (a-c) Işımalı geçişler: (a) banttan banda, (b) verici seviyesinden valans bandına, (c) iletkenlik bandından alıcı bandına, (d) bir orta seviyeden ışımsız geçiş ..... | 31    |
| Şekil 4.1. GS289 ve GS293 numunelerinin büyütme şekilleri .....                                                                                                                  | 37    |
| Şekil 4.2. GS289 numunesinin büyütme grafiği.....                                                                                                                                | 39    |
| Şekil 4.3. GS293 numunesinin büyütme grafiği.....                                                                                                                                | 41    |
| Şekil 4.4. GS295 ve GS298 numunelerinin büyütme şekilleri .....                                                                                                                  | 41    |
| Şekil 4.5. GS295 numunesinin büyütme grafiği.....                                                                                                                                | 43    |
| Şekil 4.6. GS298 numunesinin büyütme grafiği.....                                                                                                                                | 45    |
| Şekil 4.7. GS300 ve GS301 GaP/Si kalibrasyon numunelerinin büyütme şekilleri .....                                                                                               | 45    |
| Şekil 4.8. GS300 numunesinin büyütme grafiği.....                                                                                                                                | 47    |
| Şekil 4.9. GS301 numunesinin büyütme grafiği.....                                                                                                                                | 49    |
| Şekil 4.10. GS303 ve GS304 numunelerinin büyütme şekilleri .....                                                                                                                 | 49    |
| Şekil 4.11. GS303 numunesinin büyütme grafiği.....                                                                                                                               | 51    |
| Şekil 4.12. GS304 numunesinin büyütme grafiği.....                                                                                                                               | 53    |
| Şekil 4.14. GS295 ve GS298 numunelerinin HRXRD kırınım desenleri.....                                                                                                            | 55    |
| Şekil 4.17. GS289 ve GS293 numunelerinin PL spektrumları .....                                                                                                                   | 58    |
| Şekil 4.18. GS295 ve GS298 numunelerinin PL spektrumları .....                                                                                                                   | 59    |
| Şekil 4.19. GS300 ve GS301 numunelerinin PL spektrumları .....                                                                                                                   | 59    |
| Şekil 4.21. GS295 ve GS298 numunelerinin karşılaştırmalı $\ln(I)$ -V grafikleri.....                                                                                             | 66    |
| Şekil 4.22. GS303 ve GS304 numunelerinin farklı tavlama sıcaklıklarında $\ln(I)$ -V grafikleri.....                                                                              | 66    |

## RESİMLERİN LİSTESİ

| Resim                                                                              | Sayfa |
|------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Resim 3.1. Gazi-FOTONİK’de bulunan VG-Semicon V80H MBE sistemi .....               | 24    |
| Resim 3.2. Bruker D8 Discover XRD cihazının genel görünümü.....                    | 28    |
| Resim 3.3. Lake Shore 7700 serisi Hall etkisi ölçüm sistemi.....                   | 29    |
| Resim 3.4. Jobin Yvon Florog-550 PL ölçüm sistemi.....                             | 31    |
| Resim 3.5. BesTec vakum-buharlaştırma (evaporasyon) sistemi.....                   | 32    |
| Resim 3.6. BesTec püskürtme (sputtering) sistemi .....                             | 33    |
| Resim 3.7. Hızlı ısıtma (RTA) sistemi.....                                         | 34    |
| Resim 3.8. Keithley 4200 yarıiletken karakterizasyon sistemi.....                  | 35    |
| Resim 4.1. (a) Yuvarlak delikli maske, (b) Kare maske .....                        | 62    |
| Resim 4.2. (a) GS295, (b) GS298 numunelerinin ön yüzey AuNiGe kontakları .....     | 64    |
| Resim 4.3. GS303 ve GS304 numunelerinin, (a) ön yüzey, (b) arka yüzey kontakları.. | 65    |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

| Simgeler             | Açıklama                              |
|----------------------|---------------------------------------|
| $a$                  | Örgü sabiti                           |
| $\text{\AA}$         | Angström                              |
| $\text{nm}$          | Nanometre                             |
| $\text{eV}$          | Elektron volt                         |
| $^{\circ}\text{C}$   | Santigrat derece                      |
| $b$                  | Bükülme parametresi                   |
| $E_a$                | Alıcı enerji düzeyi                   |
| $E_d$                | Verici enerji düzeyi                  |
| $E_C$                | İletkenlik bandı enerjisi             |
| $E_F$                | Fermi enerji seviyesi                 |
| $E_g$                | Yasak enerji aralığı                  |
| $E_V$                | Valans bandı enerjisi                 |
| $N_A^-$              | İyonize olmuş alıcı atom              |
| $N_D^+$              | İyonize olmuş verici atom             |
| $E_-$                | Düşük enerjili alt bantın enerjisi    |
| $E_+$                | Yüksek enerjili alt bantın enerjisi   |
| $E_N$                | Yerleşik azot seviyesi                |
| $\lambda$            | Dalgaboyu                             |
| $T$                  | Sıcaklık                              |
| $T_{\text{Alttaş}}$  | Alttaş sıcaklığı                      |
| $T_{\text{Tavlama}}$ | Tavlama sıcaklığı                     |
| $\theta$             | X-ışını demetinin düzleme gelme açısı |
| $x, y$               | Alaşım oranı (kompozisyonu)           |
| $k.b.$               | Keyfi birim                           |
| $V_H$                | Hall voltajı                          |
| $n$                  | Taşıyıcı yoğunluğu                    |
| $\rho$               | Özdirenç                              |

| <b>Simgeler</b>            | <b>Açıklama</b>              |
|----------------------------|------------------------------|
| <b>%</b>                   | Yüzde                        |
| <b>sccm</b>                | Gaz akış miktarı             |
| <b>W</b>                   | Watt (güç)                   |
| <b>A</b>                   | Amper                        |
| <b>V</b>                   | Volt                         |
| <b><math>\eta</math></b>   | Diyot idealite faktörü       |
| <b><math>I_0</math></b>    | Doyum akımı                  |
| <b><math>\Phi_B</math></b> | Potansiyel engel yüksekliği  |
| <b>Si</b>                  | Silikon                      |
| <b>Ga</b>                  | Galyum                       |
| <b>As</b>                  | Arsenik                      |
| <b>N</b>                   | Azot                         |
| <b>P</b>                   | Fosfor                       |
| <b>GaP</b>                 | Galyum Fosfat                |
| <b>GaAs</b>                | Galyum Arsenik               |
| <b>GaAsP</b>               | Galyum Arsenik Fosfat        |
| <b>GaPN</b>                | Galyum Fosfat Nitrat         |
| <b>GaAsN</b>               | Galyum Arsenik Nitrat        |
| <b>GaAsPN</b>              | Galyum Arsenik Fosfat Nitrat |

| <b>Kısaltmalar</b> | <b>Açıklama</b>                      |
|--------------------|--------------------------------------|
| <b>AFB</b>         | Anti faz bölge                       |
| <b>BAC</b>         | Bant zıt-geçiş modeli                |
| <b>C-V</b>         | Kapasitans-Voltaj                    |
| <b>ECR</b>         | Elektron siklotron rezonans          |
| <b>HMA</b>         | Oldukça uyumsuz alaşım               |
| <b>HRXRD</b>       | Yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı |
| <b>I-V</b>         | Akım-Gerilim                         |
| <b>LD</b>          | Lazer diyot                          |
| <b>LED</b>         | Işık yayan diyot                     |

**Kısaltmalar****Açıklama**

|              |                                           |
|--------------|-------------------------------------------|
| <b>MBE</b>   | Moleküler demet epitaksi                  |
| <b>MEE</b>   | Göç yoluyla epitaksi                      |
| <b>MIG</b>   | Gözetim iyon ölçer                        |
| <b>MOCVD</b> | Metal organik kimyasal buhar birikimi     |
| <b>MOVPE</b> | Metal organik buhar faz epitaksi          |
| <b>OEIC</b>  | Optoelektronik entegre devre              |
| <b>PD</b>    | Fotodedektör                              |
| <b>PL</b>    | Fotoluminesans                            |
| <b>RF</b>    | Radyo frekans                             |
| <b>RHEED</b> | Yüksek enerjili elektron yansıma kırınımı |
| <b>RTA</b>   | Hızlı ısıt tavlama                        |
| <b>SC</b>    | Güneş hücresi                             |
| <b>SI</b>    | Yarı yalıtkan                             |
| <b>VCA</b>   | Sanal kristal yaklaşıklığı                |
| <b>VCSEL</b> | Yüzey salımlı lazer                       |
| <b>XRD</b>   | X-Işını kırınımı                          |

## 1. GİRİŞ

Yarıiletken malzemeler, 1940'lerden beri araştırılmakta ve bu araştırmalar sonucunda geliştirilen elektronik ve optoelektronik aygıtlar, sivil, askeri ve uzay teknolojisindeki pek çok uygulamada kullanılmaktadır. Yarıiletken malzemeler, yapay büyütme tekniklerinin gelişimine bağlı olarak gün geçtikçe yeni ve üstün özelliklere sahip olmakta ve buna paralel olarak uygulama alanları genişlemektedir. Bu malzemelerin gelişmesi ile ışık yayan diyot (LED), yüksek elektron mobiliteli transistör (HEMT), lazer diyot (LD), güneş hücresi (SC) ve fotodetektör (PD) gibi optoelektronik aygıtlar gün geçtikçe daha verimli hale gelmektedir [1-3].

Optoelektronik aygıtların üretildiği malzemeler dikkate alındığında ise, p-tipi ve n-tipi katmanların üst üste büyütülmesi ile oluşturulan p-n eklem yapılar, aygıt teknolojisi için büyük önem taşımaktadır. Yarıiletken p-n eklem yapıların epitaksiyel büyütme teknikleri ile elde edilmesi, üstün özellikli malzeme geliştirilmesinde ve dolayısıyla elektronik ve optoelektronik cihazların üretiminde önemli bir role sahiptir. Son yıllarda, yüksek kristal kalitesine sahip yarıiletken katmanların üretiminde, Moleküler Demet Epitaksi (MBE), Metal Organik Buhar Faz Epitaksi (MOVPE) ve Metal Organik Kimyasal Buhar Birikimi (MOCVD) gibi gelişmiş kristal büyütme yöntemleri kullanılmaktadır [4-7].

Kristal büyütme yöntemlerinin gün geçtikçe gelişmesi, seyreltik azotlu yarıiletken yapılar (III-V-N), gibi yeni tür malzemelerin büyütülebilmesine imkan sağlamaktadır. Seyreltik azotlu yarıiletkenler, III-V grubu yarıiletkenler içerisine eklenen düşük orandaki azot (N) atomlarının, arsenik (As) veya fosfor (P) atomları yerine yerleşmesiyle oluşmaktadır. Yüksek verimli güneş hücresi, LED ve LD üretiminde 1990'lı yıllardan beri artan bir teknolojik öneme sahip olan III-V grubu seyreltik azotlu yarıiletken yapılara, GaAsN, GaPN, GaAsPN, InGaAsN ve InGaAsNSb alaşımları örnek olarak verilebilir. Özellikle GaAsPN ve GaPN alaşımları, üstün fiziksel özellikleri ve aygıt üretim potansiyelleri nedeniyle son zamanlarda dikkatleri üzerine çekmektedirler [8-12]. Yapıya giren azot sayesinde, bu yapıların elektriksel, optik, yapısal ve termal özelliklerinde önemli değişiklikler meydana gelmektedir. Bu değişimler, seyreltik azotlu yapıların optoelektronik aygıtlardaki kullanım alanını genişletmektedir. Özellikle azotun bant aralığına olan etkisi, istenilen bant aralığına

sahip yarıiletken malzemelerin elde edilmesini sağlayarak, bant aralığı mühendisliğine imkan sağlamaktadır.

III-V-N yarıiletkenlerin; gelişmekte olan kristal büyütme teknolojilerine, uygulama alanlarındaki yeniliklerine ve pek çok araştırma grubunun üzerinde çalışmasına rağmen, epitaksiyel olarak büyütölmelerinde çözölmesi gereken problemler güncelliğini korumaktadır. Azotun VA grubu atomlarıyla yer değiştirmesi sonucunda oluşan nokta kusurları ve diğer yapısal kusurlar, bant aralığında derin seviyelerin oluşmasına neden olmakta ve bu durum, alaşımların kristal kalitesinin azalmasında önemli rol oynamaktadır [11, 12]. Kristal kalitesi ise, optoelektronik aygıt performansını etkileyen önemli parametrelerden biridir. Yapısal kusurlardan arınmış, kaliteli kristal elde etmedeki zorluklar, aşılmaması gereken problemler içerisinde yer almaktadır. Bu tez çalışmasında yer alan yapıların, HRXRD ve PL analizleri yapılarak ve meydana gelen kusurların azaltılması hedefiyle, elde edilen sonuçlar değerlendirildi. Bulgular doğrultusunda, yapısal kusurları azaltabilecek büyütme şartları/süreçleri geliştirildi.

Seyretilik azotlu yarıiletkenlerden GaPN ve GaAsPN, GaP ve Si alttaşlar üzerine örgü uyumlu ve yüksek kristal kalitesine sahip olarak büyütölebilmektedir. GaPN/Si ve GaAsPN/Si yapılarından aygıt geliştirilmesindeki temel amaç, Si temelli teknolojiyi III-V grubu yarıiletkenlerin üstönlükleri ile bütünleştirmektir. Ancak, Si alttaş üzerine GaP veya III-V-N grubu bileşimlerin büyütölmesinde oluşan yapısal kusurlar önemli bir problemidir. Bu problemin kaynağı, IV. Grup elementleri ile III-V grubu bileşimler arasındaki örgü simetrisi farklılığıdır. Bu farklılık, arayüzeyde anti faz bölgelerinin (AFB) oluşumuna neden olmaktadır. Bu problem, farklı yöntem ve teknikler kullanılarak en aza indirilebilmektedir [13]. Bu tez kapsamında, GaP/Si kalibrasyon numuneleri büyütölerek, Si üzerine yüksek kristal kalitesinde GaP büyütölmesini sağlayacak uygun yöntem belirlendi.

Bu tez kapsamında; seyretilik azotlu yarıiletkenlerin, Si ve GaP alttaşlar üzerine yüksek kristal kalitesinde, bilinen ve yaygın olarak kullanılan bir teknik olan RF plazma destekli katı kaynaklı MBE yöntemi kullanılarak büyütölmesi amaçlandı. Ayrıca, büyütölen numunelerin yapısal, elektriksel ve optik özelliklerinin incelenmesi de bu çalışmadaki hedefler arasındadır.

Bu amaçlar doğrultusunda, tez çalışması beş bölüm olarak řu şekilde düzenlendi;

- ✓ Birinci bölümde; bu çalışmanın önemini ve amacını vurgulayan bilgiler verildi.
- ✓ İkinci bölümde; yarıiletken malzemeler, p-n eklem yapılar ve seyreltik azotlu yarıiletkenler hakkında genel bilgiler verildi. Ayrıca, bu tez çalışmasında kullanılan GaP bileşiği, seyreltik azotlu GaPN ve GaAsPN alaşımları kısaca tanıtıldı.
- ✓ Ünc bölümde; yapıların bytlmesinde kullanılan MBE sistemi, büyütülen numunelerin yapısal özelliklerinin incelendiği yüksek znrlkl X-ışını kırınımı (HRXRD) sistemi, elektriksel özelliklerin incelendiği Hall etkisi ölçüm sistemi, optik özelliklerin analiz edildiği fotoluminesans (PL) sistemi, diyot fabrikasyonunda kullanılan püskürtme (sputtering), vakum-buharlaştırma ve hızlı ısıl tavlama (RTA) sistemleri ile aygıt karakterizasyonu için kullanılan I-V lm sistemi tanıtıldı.
- ✓ Dördüncü bölümde; MBE tekniği kullanılarak büyütülen katkı kalibrasyon numuneleri, GaP/Si kalibrasyon numuneleri, Si ve GaP alttaşlar üzerine büyütülen p-n eklem GaPN ve GaAsPN yapılarının büyütme adımları anlatıldı. Ayrıca, numunelerin analiz sonuçları irdelenerek yapısal, optik ve elektriksel özellikleri belirlendi. Diyot fabrikasyonu yapılarak aygıt parametreleri hesaplandı.
- ✓ Beşinci bölümde ise; elde edilen analiz sonuçları değerlendirildi.

Kullanılan numunelerin bytlmesinde ve karakterizasyonunda, Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezinde (Gazi-FOTONİK) bulunan ince film kristal büyütme ve karakterizasyon altyapısı kullanıldı. Bu alışma, bilgimiz dahilinde, ülkemizde seyreltik azotlu yarıiletkenlerin bytlmesinde bir ilk olma özelliği taşıyarak, ülkemizdeki yarıiletken teknolojisine katkı sağlayacak ve bu alandaki çalışmalara öncülük edecektir.



## 2. GENEL BİLGİLER

Bu bölümde, yarıiletken malzemeler, yarıiletken p-n eklem yapılar ve seyreltik azotlu yarıiletkenler hakkında bilgi verildi. Ayrıca bu çalışmada kullanılan GaP yarıiletken bileşiği, GaPN ve GaAsPN seyreltik azotlu yarıiletken alaşımları tanıtıldı.

### 2.1. Yarıiletken Malzemeler

Yarıiletkenler, elektriksel iletkenlikleri metaller ile yalıtkanlar arasında olan malzemelerdir. Bu malzemeler, normal koşullar altında yalıtkandır ve dış etkenlerle (ısı, ışık, gerilim, vb.) uyarıldığında enerji alarak iletken özellik gösterirler. Yarıiletkenlerin en önemli iki özelliği, serbest elektronların bulunduğu iletkenlik bandı ile bağlı elektronların bulunduğu valans bandı arasında bir yasak enerji aralığının bulunması ve yapılacak çok düşük orandaki uygun katkının, elektriksel özelliklerine büyük ölçüde etki etmesidir.

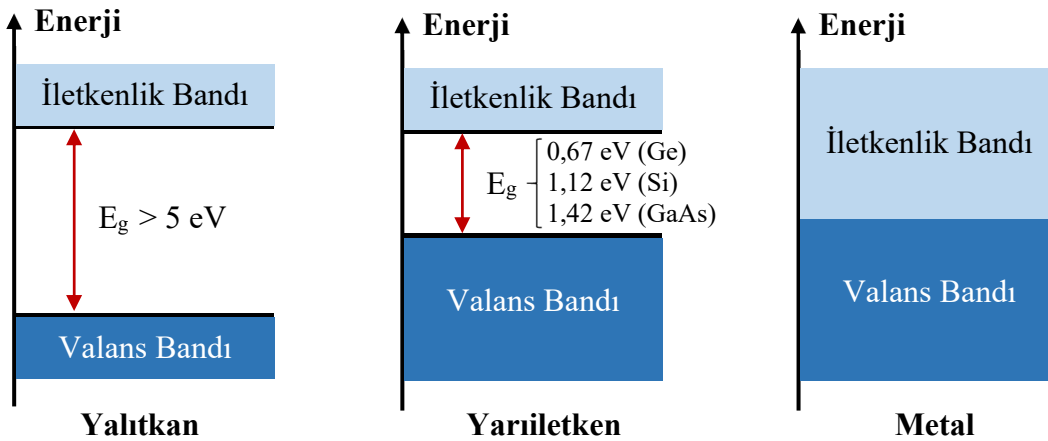
Elektronik ölçekte kullanılabilen üstün kristal kalitesine sahip yarıiletken malzeme geliştirme çalışmalarına 19. yüzyılın başlarında başlanmış ve günümüze kadar farklı elektronik, elektro-optik ve optoelektronik uygulamada kullanılabilen çok sayıda yarıiletken malzeme geliştirilmiştir. Yarıiletken malzemelere örnek verilebilecek Silisyum (Si) ve Germanyum (Ge) element yarıiletkenleri, doğal yarıiletkenlere tek örnektir. Periyodik tabloda IIA ve VIA grupları arasında kalan elementlerin (Çizelge 2.1) bileşimiyle oluşturulan GaAs, GaP, GaAsP gibi III-V grubu yarıiletkenleri ile HgTe, CdTe, HgCdTe gibi II-VI grubu yarıiletkenleri, yapay yarıiletkenlerdir ve farklı üretim teknikleri kullanılarak elde edilirler [1].

Çizelge 2.1. II-VI grupları arasında kalan elementler [1]

| <i>II</i> | <i>III</i> | <i>IV</i> | <i>V</i> | <i>VI</i> |
|-----------|------------|-----------|----------|-----------|
|           | B          | C         | N        | O         |
|           | Al         | Si        | P        | S         |
| Zn        | Ga         | Ge        | As       | Se        |
| Cd        | In         | Sn        | Sb       | Te        |
| Hg        | Tl         | Pb        | Bi       | Po        |

Kristal örgünün periyodikliği nedeniyle yarıiletkenlerde izinli ve yasak bant olarak adlandırılan enerji bölgeleri oluşur. Elektronlar tarafından işgal edilebilen enerji seviyeleri izinli bantları oluştururken, izinli bantların arasında elektronlarca işgal edilemeyen yasak bantlar bulunur. Yasak bant aralığı, yarıiletkenlerin birçok özelliğini tanımlamakta kullanılan önemli bir parametredir. İzinli enerji bölgeleri, yasak bandın altında ve üstünde yer alır. Yasak bandın altında kalan ve bağlı elektronların oluşturduğu enerji bölgesi valans bandı, üstünde kalan ve serbest elektronların oluşturduğu enerji bölgesi ise iletkenlik bandı olarak adlandırılır [2].

0 K (-273 °C)'de tüm elektronlar valans bandında bulunur. İletkenlik bandında birçok boş seviye olduğundan, yarıiletkenlere uygulanan uygun bir potansiyel elektronları hareket ettirerek iletkenlik bandına çıkartabilir. Metallerde iletkenlik bandı ile valans bandı çakışık, bu nedenle valans bandındaki elektronlar iletkenlik bandına neredeyse hiçbir dış etki olmadan geçer ve iletkenlik sağlar. Yalıtkanlarda ise iletkenlik bandı ile valans bandı arasındaki enerji aralığı, uygulanan dış etki ile aşılamayacak kadar fazladır. Metal, yalıtkan ve yarıiletkenlerin bant yapıları Şekil 2.1'de verildi. Yarıiletkenlerin iletkenliği genellikle sıcaklığa, aydınlatmaya, manyetik alana, basınca ve safsızlık atomlarının yoğunluğuna bağlıdır. İletkenlikteki bu tür bağımlılıklar, yarıiletkenleri elektronik uygulamalar için en önemli malzemelerden biri haline getirir [2, 3].



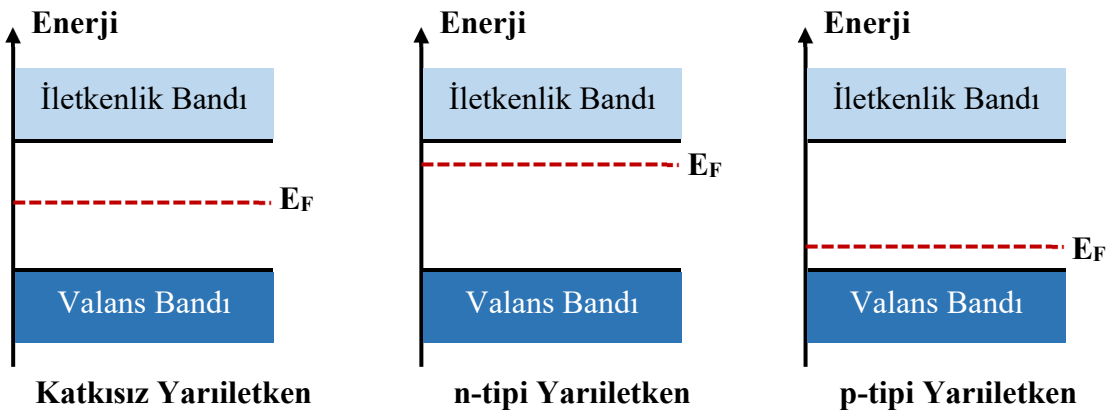
Şekil 2.1. Metal, yalıtkan ve yarıiletkenlerde bant yapıları [2]

Yarıiletken malzemeler üretilirken uygun katkı atomları ile katkılanarak n-tipi ve p-tipi yarıiletkenler oluşturulabilir. Yarıiletkenleri katkısız (saf) ve katkılı olarak iki kategoride incelemek mümkündür.

Katkısız yarıiletken malzemeler, herhangi bir katkı atomu içermedikleri için saf yarıiletkenler olarak da adlandırılır. Bu tip yarıiletkenlerde elektron sayısı deşiklerin sayısına eşittir ve yük taşıyıcı olarak her ikisi de kullanılabilir.

Yarıiletkenlerin elektriksel özelliklerini değiştirmek için, yarıiletken kristalini oluşturan atomlardan bir kısmının yerine farklı fakat uygun atomların yerleştirilmesi işlemi katılama olarak adlandırılır. Katkılı yarıiletkenler, çoğunluk yük taşıyıcıların tipine göre p-tipi ve n-tipi olmak üzere iki çeşittir. p-tipi yarıiletken malzemelerde çoğunluk yük taşıyıcıları deşikler, n-tipi yarıiletken malzemelerde ise elektronlardır.

Fermi enerji ( $E_F$ ),  $T=0$  K'de bir elektronun doldurabileceği en yüksek seviyenin enerjisidir. Katkısız yarıiletkenlerde Fermi seviyesi, iletkenlik ve valans bandının tam ortasında bulunur. Fermi seviyesi, n-tipi yarıiletkenlerde iletkenlik bandına yakın, p-tipi yarıiletkenlerde ise valans bandına yakındır [4]. Yarıiletkenlerde Fermi seviyesinin konumları Şekil 2.2'de verildi.

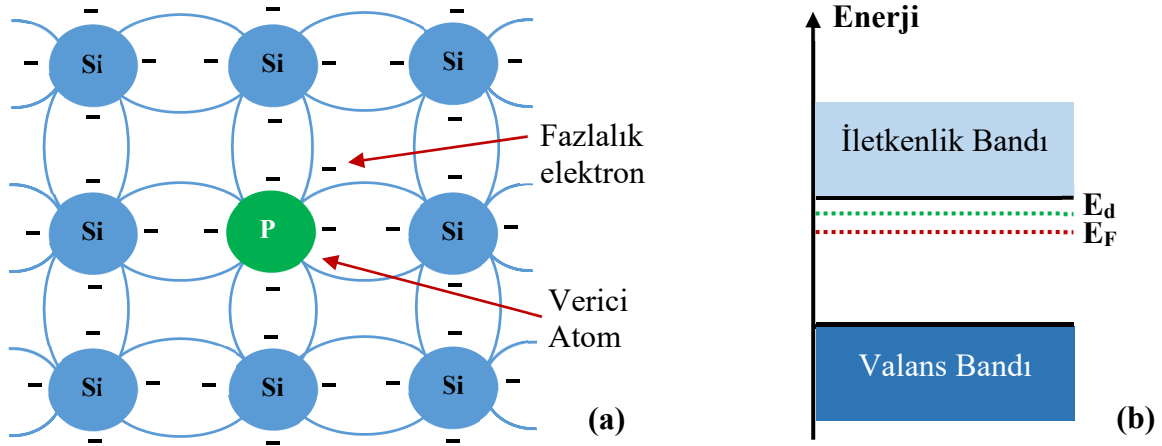


Şekil 2.2. Katkılı ve katkısız yarıiletkenlerde fermi seviyesinin konumları [4]

### 2.1.1. n-tipi yarıiletkenler

Kristale elektron veren katkı atomlarına verici ve bu atomlarla katkılanan yarıiletkene n-tipi yarıiletken denir. n-tipi yarıiletkenlerde elektron sayısı deşiklerden fazla olduğu için elektronlar çoğunluk yük taşıyıcısı, deşikler ise azınlık yük taşıyıcısıdır. Farklı yarıiletken malzemeleri n-tipi katılamak için farklı verici atomlar kullanmak gerekir. Örneğin IV. Gruptaki Si ve Ge yarıiletkenleri için V. Grup elementleri verici atom olarak kullanılmaktadır. Periyodik cetvelde V. Grup elementlerinden olan fosfor (P), Silikon

kristalini oluşturan dört değerlik elektronuna sahip Silikon atomları ile kovalent bağ yaparak fazlalık bir elektronunu kristale verir (Şekil 2.3.a). Her verici atom kristale bir fazlalık elektron sağladığı için kristalde negatif (-) yüklü taşıyıcı yoğunluğu artmış olur [5].



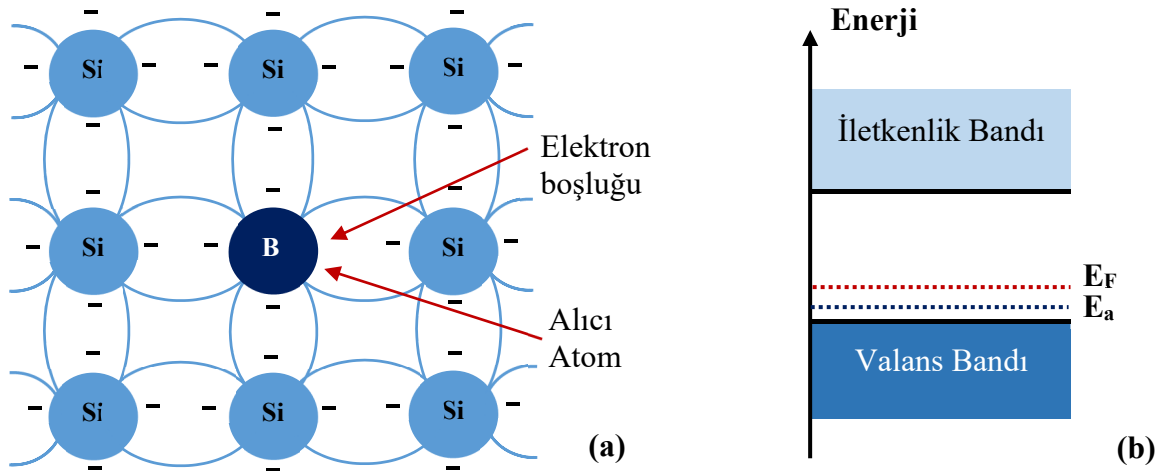
Şekil 2.3. (a) Silikon kristalinde verici atom safsızlığı, (b) n-tipi yarıiletkenin verici ( $E_d$ ) ve fermi ( $E_F$ ) seviyeleri [2]

Verici atomların yarıiletken kristalin bant yapısında oluşturduğu enerji düzeyi ( $E_d$ ), yasak enerji aralığında ve verici atomların iyonlaşma enerjisi kadar iletkenlik bandının altında yer alır. Bu tip yarıiletkenlerde Fermi seviyesi ( $E_F$ ), iletkenlik bandına yaklaşır (Şekil 2.3.b). Bu durum, yapının elektron yoğunluğunun fazla olduğunu göstermektedir [2, 5].

### 2.1.2. p-tipi yarıiletkenler

Pozitif yük taşıyıcıları olan boşlukları üreten katkı atomları alıcı olarak bilinir ve bu atomlarla katkılanmış yarıiletkenlere de p-tipi yarıiletken denir. p-tipi yarıiletkenlerde boşluk sayısı elektronlardan fazla olduğu için boşluklar çoğunluk yük taşıyıcısı, elektronlar ise azınlık yük taşıyıcısıdır.

n-tipi katkılı yarıiletkenlerde olduğu gibi farklı yarıiletkenleri p-tipi yapabilmek için farklı alıcı atomlarıyla katkılamak gerekir. Örneğin IV. Gruptaki Si ve Ge yarıiletkenleri için III. Grup elementleri alıcı atom olarak kullanılmaktadır. Periyodik cetvelde III. Grup elementlerinden olan Bor (B), Silikon kristalini oluşturan dört değerlik elektronuna sahip Silikon atomları ile kovalent bağ yapmak için kristalden bir elektron alır. Her alıcı atom kristalden bir elektron aldığı için kristalde pozitif (+) yüklü boşlukların yoğunluğu artmış olur [5] (Şekil 2.4.a).



Şekil 2.4. (a) Silikon kristalinde alıcı atom safsızlığı, (b) p-tipi yarıiletkende alıcı ( $E_a$ ) ve fermi ( $E_F$ ) seviyeleri [2]

Alıcı atomların yarıiletken kristalin bant yapısında oluşturduğu enerji düzeyi ( $E_a$ ), yasak enerji aralığında ve valans bandının üzerinde yer alır. Bu tip yarıiletkenlerde, fermi seviyesi ( $E_F$ ), valans bandına yaklaşır (Şekil 2.4.b) [2, 5].

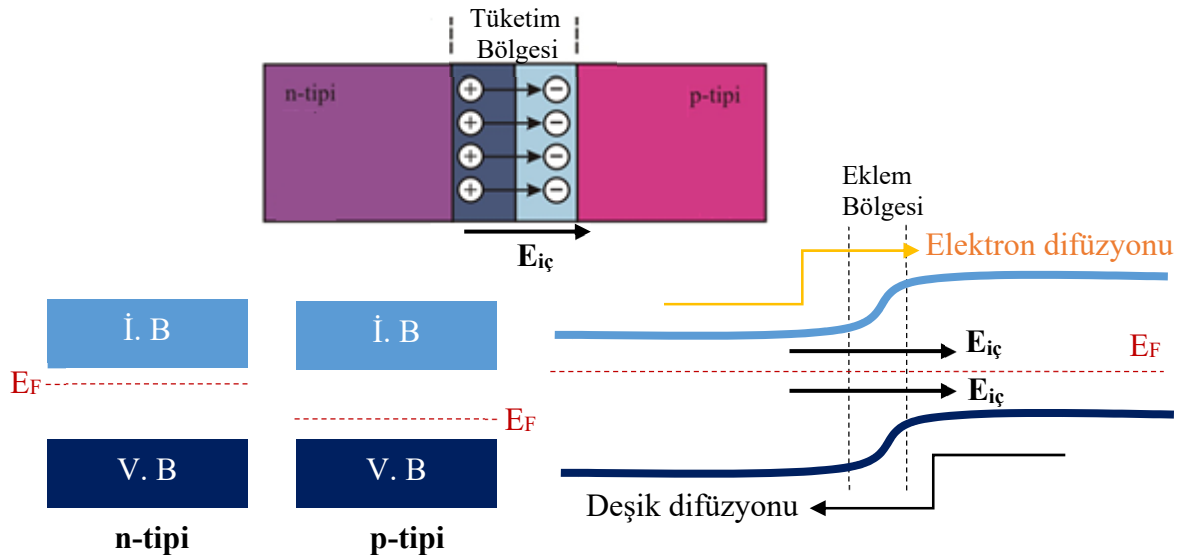
## 2.2. Yarıiletken p-n Eklem Yapılar

p-n eklemler, çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlar olan n-tipi yarıiletkenler ile çoğunluk yük taşıyıcıları deşikler olan p-tipi yarıiletken malzemelerin bir araya getirilmesiyle oluşan yapılardır. Neredeyse tüm elektronik ve optoelektronik uygulamada önemli bir rol üstlenen p-n eklem yapılar, doğrultucu diyotlar, ışık yayan diyotlar (LED), güneş hücreleri (SC), lazer diyotlar (LD), transistörler ve fotodetektörler (PD) başta olmak üzere pek çok aygıtın temelini oluşturmaktadır.

p-n eklem yapılar, epitaksiyel büyütme sürecinde birbiri üzerine büyütülen tabakaların uygun elementlerle p-tipi ve n-tipi olarak katkılanmasıyla elde edilebilmektedir. Bunun dışında p-n eklemler, difüzyon, iyon ekimi, termal tavlama ve oksidasyon gibi yöntemlerle de oluşturulabilmektedir [4, 6].

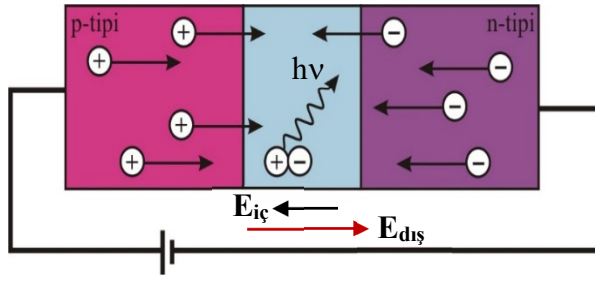
p-tipi ve n-tipi yarıiletkenler bir araya getirildiğinde, oluşan eklemün iki bölgesindeki taşıyıcı konsantrasyonu farkından dolayı, bir başka deyişle iki bölgenin Fermi seviyelerinin farkı nedeniyle taşıyıcı difüzyonu oluşur. Yüksek deşik yoğunluğuna sahip p-tipi taraftaki deşikler yoğunluğun az olduğu n-tipi tarafına, yüksek elektron yoğunluğuna sahip n-tipi

tarafındaki elektronlar ise p-tipi tarafına doğru Fermi seviyeleri eşitlenene kadar nüfuz eder. p-tipi tarafına geçen elektronlar boşluklarla yeniden birleşir. Boşluklar p-tipi taraftan ayrıldıkça, eklem yakınındaki iyonize olmuş alıcı iyonlar ( $N_A^-$ ), elektronlar n-tipi taraftan ayrıldıkça, eklem yakınındaki iyonize olmuş verici iyonlar ( $N_D^+$ ) dengelenmemiş olarak kalır. Dolayısıyla, eklem n-tipi tarafı yakınında pozitif ve p-tipi tarafı yakınında ise negatif yüklü bir tabaka oluşur. Eklem bölgesinde oluşan ve hareketli taşıyıcı yoğunluğunun sıfır olduğu bölge olan uzay yükü bölgesi (tüketim bölgesi), pozitif yükten negatif yüke doğru bir iç elektrik alan ( $E_{iç}$ ) oluşmasına neden olur. Bu bir engel potansiyeli meydana getirir [2, 7, 8] (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Eklem oluşumunda yük taşıyıcılarının hareketi ve enerji-bant diyagramı [4]

Eklem bölgesindeki elektrik alan, bu bölgedeki elektronları n-tipi tarafına doğru, boşlukları ise p-tipi tarafına doğru sürükler. Pozitif ve negatif yüklerdeki bu sürüklenme, sürüklenme akımı meydana getirir. Termal denge durumunda sürüklenme akımı ile difüzyon akımı dengededir. p-n ekleme uygulanan gerilim, elektronların ve boşlukların difüzyon akımı ile sürüklenme akımı arasındaki dengeyi bozar. Doğru beslemde (p-tipi tarafına pozitif, n-tipi tarafına negatif gerilimin uygulanması) uygulanan gerilim, tüketim bölgesi boyunca elektrostatik potansiyeli azaltır. Bu durumda sürüklenme akımı, difüzyon akımına göre azalır. p-tipi tarafından, n-tipi tarafına doğru artmış boşluk difüzyonu ve n-tipi tarafından p-tipi tarafına doğru elektron difüzyonu oluşur, boşluklar n-tarafına doğru itelenirken elektronlar p-tarafına doğru itelenir. Eklem yakınılarında karşılaşan elektronlar ve boşluklar yeniden birleşir (Şekil 2.6) [4, 7].



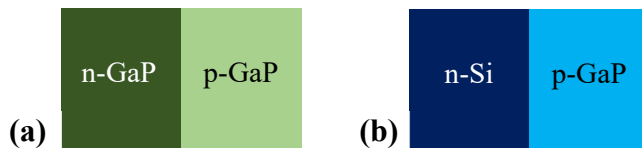
Şekil 2.6. Doğru beslemde p-n eklem [4]

Yeniden birleşme sonucunda, eklemde foton salınır. Bu mekanizma, ışık yayan diyotların (LED) ve lazer diyotların (LD) temelini oluşturur. Benzer şekilde eklemde ışık düşürülmesi, gelen fotonun eklem bölgesinde elektron-deşik çifti oluşturmasına neden olur. Oluşan elektron ve deşikler iç elektrik alan etkisiyle p-tipi ve n-tipi tarafa itelenerek akım oluşturur. Bu mekanizma da, güneş hücreleri (SC) ve fotodetektörlerin (PD) temelini oluşturmaktadır.

p-n eklem yapılarını, bir araya getirilen p-tipi katkılanmış yarıiletken malzeme ile n-tipi katkılanmış yarıiletken malzemenin aynı veya farklı olmasına göre iki gruba ayırabiliriz [8].

i. *Aynı tür eklem (Homoeklem)*: Aynı yarıiletken malzemenin p-tipi ve n-tipi katkılanması ve bir araya getirilmesiyle elde edilen eklem, aynı tür eklem olarak adlandırılır. Örneğin n-tipi ve p-tipi olarak katkılanmış GaP yarıiletkeninin oluşturduğu eklem, aynı tür eklem örnektir (Şekil 2.7.a).

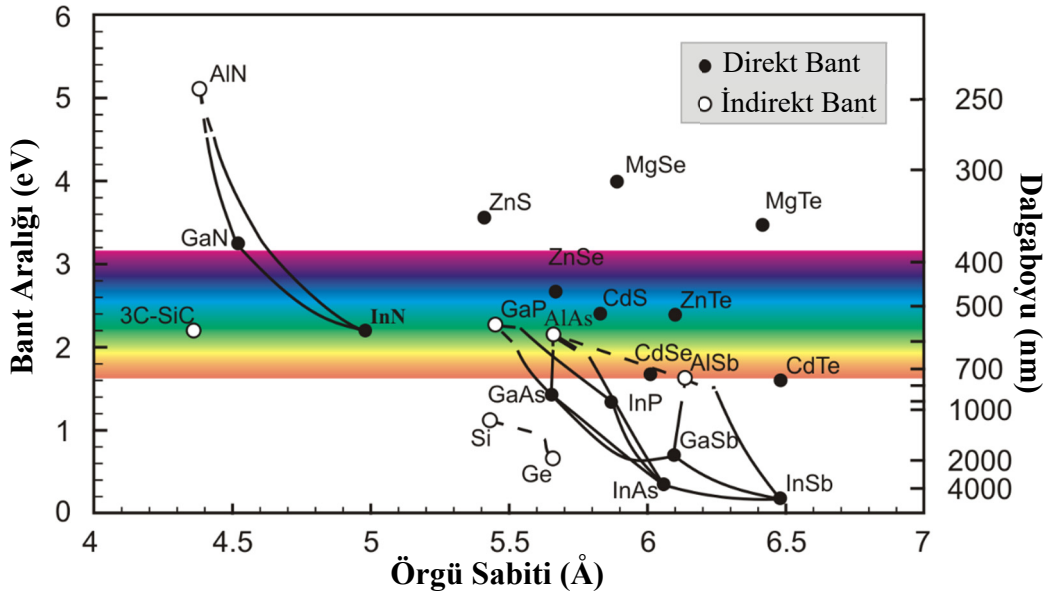
ii. *Farklı tür eklem (Heteroeklem)*: p-tipi ve n-tipi katkılanmış farklı yarıiletken malzemelerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan eklem farklı tür eklem olarak adlandırılır. Örneğin, p-tipi katkılanmış GaP yarıiletkeni ile n-tipi katkılanmış Si yarıiletkeninin oluşturduğu eklem farklı tür eklem örnektir (Şekil 2.7.b).



Şekil 2.7. (a) Aynı tür eklem, (b) Farklı tür eklem

### 2.3. Çoklu Yarıiletken Yapılar

Optoelektronik cihazlar, yarıiletken malzemelerin tek ya da çok katmanlı olarak üst üste büyütülmeleri ile elde edilmektedir. Üretilcek yapıda p-tipi ve n-tipi katkılanmış katmanlar, bir veya daha fazla eklem oluşturacak şekilde büyütülerek çok katmanlı veya kuantum kuyulu olarak oluşturulmaktadır. Farklı bileşimlerden oluşan bu katmanların örgü sabitleri arasındaki farklılıklar gerilmeli yapıların oluşmasına neden olur. Bu tabakalar üst üste büyütüldüğünde, yüzey birleşmeleri olarak adlandırılan birleşme merkezleri oluşur. Yüzey birleşmesi, yarıiletkenin yüzeyindeki boş bağlardan kaynaklanır. Örgünün bu istenmeyen süreksizliği, yüzey durumları olarak adlandırılan çok sayıda enerji durumu oluşturur. Bu boş bağlı atomlar aynı zamanda bir birleşme mekanizması gibi davranarak taşıyıcıları tuzaklar ve taşıyıcı ömrünü azaltır. Bu nedenle örgü uyumlu malzemelerin seçilerek, tabakaların üst üste büyütülmesi üretilcek aygıt performansı için büyük önem taşır [9, 10]. Yarıiletkenlerin örgü sabiti-bant aralığı diyagramı Şekil 2.8’de verildi.



Şekil 2.8. Yarıiletkenlerin örgü sabiti-bant aralığı diyagramı [9, 10]

Örgü sabiti uyumuna ek olarak, kristal yapıları, tabakaların kalınlık ve alaşım kompozisyonlarının birbirleriyle uyumlu olması, hedeflenen özellik ve verimlilikteki aygıtı ulaşabilmek için ayrıca önemlidir. Bu sebeplerden dolayı, çoklu yapıların büyütülmesinde parametrelerin hassas biçimde kontrolüne imkan veren MBE, MOVPE, MOCVD gibi gelişmiş kristal büyütme teknikleri kullanılmaktadır.

## 2.4. Seyreltik Azotlu Yarıiletkenler

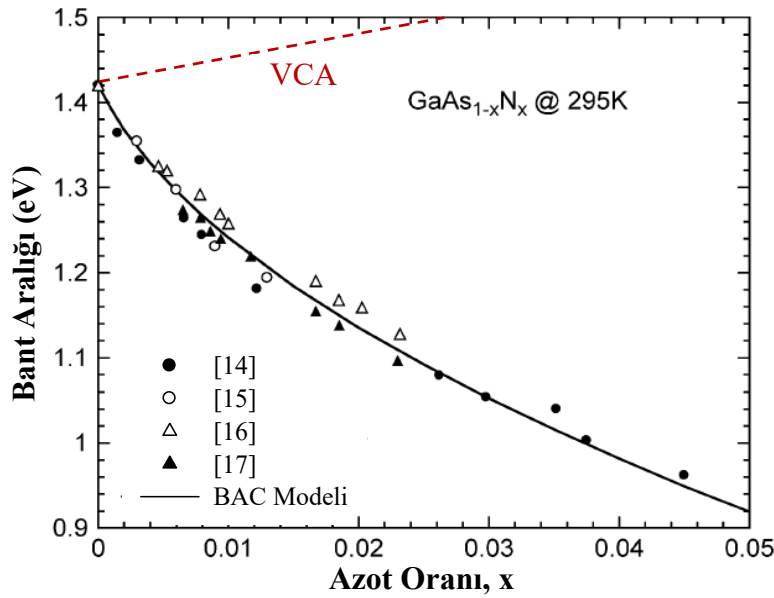
Seyreltik azotlu yarıiletkenler, III-V grubu yarıiletkenlere alaşım oranı %5'den az olacak şekilde azot (N) atomu eklenmesiyle elde edilen yarıiletkenlerdir [11]. Yapıya eklenen azot, kristal örgüde V. Grup elementlerinden bazılarının yerine geçerek III-V-N alaşım yapısını oluşturur ve III-V grubu yarıiletkenin elektriksel, optik ve yapısal özelliklerinde önemli değişiklikler meydana getirir. Seyreltik azotlu yarıiletkenlerin en yaygın örnekleri,  $\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$ ,  $\text{GaP}_{1-x}\text{N}_x$ ,  $\text{GaAs}_y\text{P}_{1-x-y}\text{N}_x$ ,  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$  ve  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$  yarıiletkenleridir. Burada x ve y alaşım oranlarını göstermektedir [12].

Diğer yarıiletkenlerden ayrılan fiziksel özellikleri ve aygıt üretim potansiyelleri nedeniyle seyreltik azotlu yarıiletken malzemelere olan ilgi, ilk kez üretildikleri 1990 yılından beri oldukça artmış ve bu alandaki gelişmeler büyük önem kazanmıştır. Son yıllarda, oldukça uyumsuz alaşımlar (Highly Mismatched Alloys, HMA) ailesinin önemli bir üyesi olan seyreltik azotlu yarıiletkenlerin araştırılması, geliştirilmesi ve büyütülmesi üzerine birçok araştırma grubu yoğun ilgi göstermektedir. Bu alaşım sınıfındaki yarıiletkenler, elektronik ve optoelektronik endüstrisinde geniş kullanım alanına sahiptir. Işık yayan diyot (LED), lazer diyot (LD), yüzey salımlı lazer (VCSEL), fotodetektör (PD), yarıiletken optik yükseltici ve modülatörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca optoelektronik entegre devreler (OEIC) ile Si tabanlı teknolojiyi bir araya getirerek, Si tabanlı optoelektronik entegre devrelere imkan sağlamaktadır [12, 13].

Seyreltik azotlu yarıiletkenlerin ilk örnekleri,  $\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$  ve  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$  alaşımlarıdır. Bu alaşımların büyütülmesindeki amaç, bant aralığı GaAs (1,42 eV) ile GaN (3,4 eV) arasında değişen yarıiletkenler elde etmektir. Ancak ilk deneysel bulgulara, III-V grubu yarıiletken örgü içerisine katılan azotun, bant aralığını beklendiği gibi arttırmak yerine azalttığı gözlemlendi [12]. Bu azalma azotun alaşım oranı ile yakından ilişkilidir (Şekil 2.9).

Birçok III-V grubu yarıiletkenin bant aralığı, Sanal Kristal Yaklaşıklığı (VCA) ile Eş. 2.1'de verilen Vegard yasası denklemi kullanılarak hesaplanabilir [18]. Ancak bu yaklaşım, seyreltik azotlu yarıiletkenlerin bant aralığı değişimini sadece çok yüksek bükülme (bowing) parametreleri (b) ile açıklayabilmektedir. Oldukça uyumsuz alaşımlarda görülen bu yüksek bükülme parametresi, örgüdeki atomlar arasındaki atom çapı, elektronegatiflik ve iyonlaşma enerjisi farkından kaynaklanmaktadır. AlGaAs ve GaAsP gibi uyumlu alaşımlarda bükülme

parametresi sırasıyla yaklaşık 0,5 eV ve 0,2 eV iken, GaAsN ve GaPN gibi seyreltik azotlu alaşımlarda bu değer sırasıyla yaklaşık 25 eV ve 15 eV dur [19]. Bu durum, azot ile diğer IIIA ve VA grubu elementleri arasındaki fiziksel parametrelerin farkından kaynaklanmaktadır. IIIA ve VA grubu elementlerinin bazı fiziksel özellikleri Çizelge 2.2’de verildi. Seyreltik azotlu yarıiletkenler gibi uyumsuz alaşımlarda, bant aralığı değişimini açıklamak için farklı yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bunlardan en yaygın kullanılanı Bant Zıt-geçiş (Band Anticrossing, BAC) modelidir [12].



Şekil 2.9. Seyreltik azotlu GaAsN yarıiletkeninde azot oranı-bant aralığı ilişkisi [14-17]

A, B ve C elementlerinden oluşan alaşımda, alaşım oranına bağlı bant aralığı değişimi,

$$E_g(A_xB_{1-x}C) = [xE_g(AC) + (1-x)E_g(BC) - bx(1-x)] \quad (2.1)$$

Vegard yasası denklemi kullanılarak hesaplanabilir. Burada  $b$ , bükülme parametresidir.

Örgüye eklenen azotun bant aralığına etkisi oldukça fazladır. Örneğin, GaAs örgüsüne %1 oranında katılan Alüminyum (Al) bant aralığını yaklaşık 12 meV kadar değiştirirken, aynı örgüye %1 oranında katılan azot bant aralığında yaklaşık 180 meV değişikliğe neden olmaktadır. Benzer etki diğer seyreltik azotlu yarıiletkenlerde de görülmektedir [12].

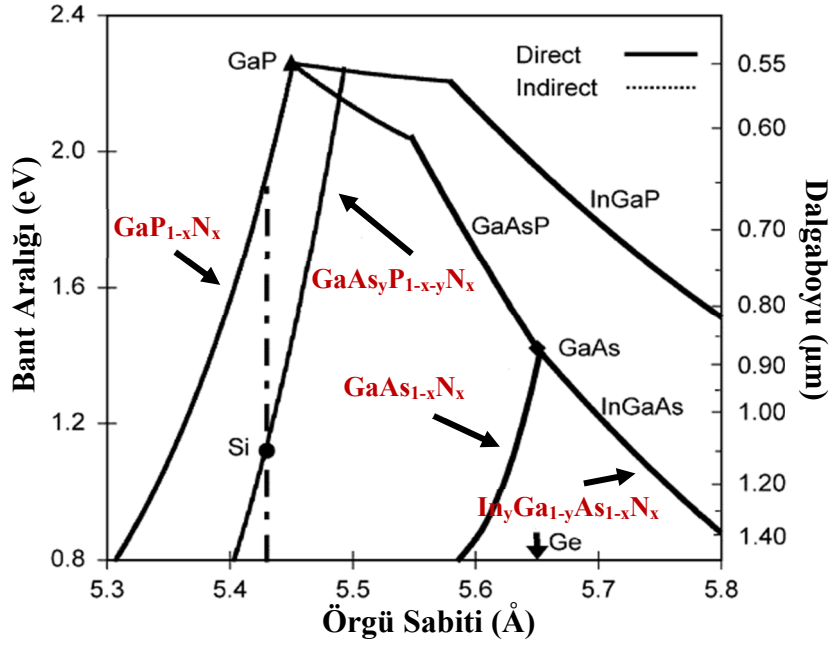
Çizelge 2.2. IIIA ve VA grubu elementlerinin bazı fiziksel özellikleri

| <i>Element</i> | <i>Grup</i> | <i>Atom Numarası</i> | <i>Elektronegatiflik (p.b.)</i> | <i>Atom Yarıçapı (Å)</i> |
|----------------|-------------|----------------------|---------------------------------|--------------------------|
| Alüminyum (Al) | III         | 13                   | 1,61                            | 1,25                     |
| Galyum (Ga)    | III         | 31                   | 1,81                            | 1,30                     |
| İndiyum (In)   | III         | 49                   | 1,78                            | 1,55                     |
| Azot (N)       | V           | 7                    | 3,04                            | 0,65                     |
| Fosfor (P)     | V           | 15                   | 2,19                            | 1,00                     |
| Arsenik (As)   | V           | 33                   | 2,18                            | 1,15                     |

Azotun yapıya girmesiyle birlikte yasak enerji aralığında meydana gelen azalma, ısıma ve soğurma dalgaboyunda artışa neden olmaktadır. Bu durum seyreltik azotlu yarıiletkenlerin uzun dalgaboyu bölgesinde çalışabilen aygıtlarda kullanılabilmesini sağlamaktadır. Ancak yapıya eklenen azotun kristal içerisinde meydana getirdiği kusurlar, üretilecek aygıtın optik ve elektriksel performansını oldukça olumsuz etkilemektedir.

III-V-N yarıiletkenlerde azot, optik ve elektriksel özelliklerin yanı sıra yapısal özelliklerde de önemli değişiklikler meydana getirir. III-V grubu yarıiletken örgüye eklenen azot, örgüde diğer VA grubu elementinin yerine geçtiğinde küçük atom çapı nedeniyle örgü sabitinde azalmaya neden olur [20]. Bu azalma, yapıdaki azotun alaşım oranıyla ilişkilidir. Bazı seyreltik azotlu yarıiletkenlerin örgü sabiti-bant aralığı diyagramı Şekil 2.10'da verildi.

Azotun yapısal özelliklere diğer etkisi, kristal örgüde meydana getirdiği kusurlardır. Azot, bir araya gelerek alaşım oluşturduğu diğer IIIA ve VA grubu atomlarına göre daha küçük yarıçapa sahiptir. Yapı içerisinde farklı boyutlara ve farklı termal özelliklere sahip atomlar farklı kinetik enerjilere sahip olur. Daha hareketli olan atomlar kristal içerisinde olmamaları gereken yerlere doğru hareket ederek gerisinde boşluk bırakabilir veya farklı atomlarla bağ yapabilir. Bu durum kristalde periyodikliği bozan nokta kusurlara neden olur. Ayrıca azotun yapı içerisinde homojen bir dağılım oluşturmaması ve büyütme sırasında diğer azot atomları ile bağ yapma eğilimi, N-N çiftlenimleri ve N-kümelenmeleri gibi kusurların da oluşmasına neden olmaktadır. Kristal içerisinde oluşan alaşım düzensizlikleri ve kusurlar, yasak enerji aralığında tuzak seviyeleri yaratarak elektriksel ve optik özellikleri olumsuz etkiler [20].

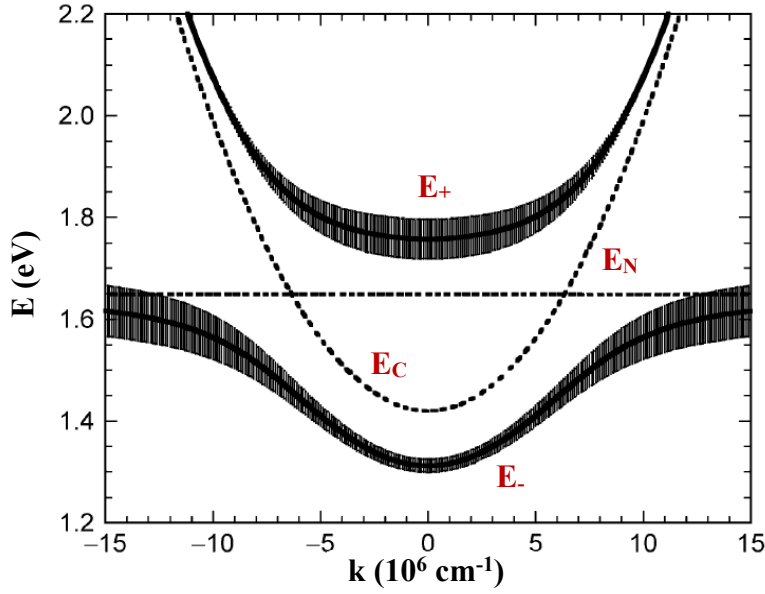


Şekil 2.10. Bazı seyreltik azotlu yarıiletkenlerin örgü sabiti-bant aralığı diyagramı [20]

#### 2.4.1. Bant zıt-geçiş (Band Anticrossing, BAC) modeli

Bant Zıt-geçiş (Band Anticrossing, BAC) modeli, seyreltik azotlu yarıiletkenlerde azotun, III-V grubu yarıiletkenin elektronik bant yapısına olan etkisini açıklamak için kullanılan en yaygın ve en uygun modeldir. Bu model, seyreltik azotu yarıiletkenler başta olmak üzere oldukça uyumsuz alaşımlar sınıfında yer alan yarıiletkenlerin yasak enerji aralıklarının ve geçiş enerjilerinin hesaplanabilmesini sağlamaktadır [21].

III-V grubu yarıiletken kristali içerisine az miktarda azot safsızlığı katılması, kristal örgünün bozulmasına neden olur. Kristal örgü içerisindeki bu safsızlık, kristalin enerji-bant yapısında değişiklik yaratır ve bir lokalize azot seviyesi oluşturur. Oluşan bu seviye, GaAs yarıiletkeninin iletkenlik bandı kenarının yaklaşık 250 meV üzerinde, GaP yarıiletkeninin iletkenlik bandı kenarının ise yaklaşık 100 meV altındadır [22]. Lokalize azot seviyesi ile iletkenlik bandı arasındaki güçlü etkileşim, iletkenlik bandının Şekil 2.11'de görüldüğü gibi  $E_-$  ve  $E_+$  olmak üzere iki alt banda ayrılmasına neden olur. Burada  $E_c$ , III-V yarıiletkenin iletkenlik bandı kenarını,  $E_N$  lokalize azot seviyesini,  $E_+$  ve  $E_-$  ise alt bantları göstermektedir.  $E_-$  seviyesi, iletkenlik bandının minimum enerji noktasıdır ve seyreltik azotlu yarıiletkenin yasak enerji aralığına karşı gelmektedir [23].



Şekil 2.11. Seyreltik azotlu GaAsN yarıiletkeninin enerji-bant yapısı [12]

III-V yarıiletkenin iletkenlik bandı ile lokalize azot seviyesinin etkileşimi, birinci mertebeden pertürbasyon teorisine göre çözülebilir. Azot enerji seviyesindeki genişlemenin sıfıra eşit olduğu varsayılarak, birinci mertebeden pertürbasyon teorisine göre özdeğerler Eş. 2.2 ile hesaplanır [21].

$$\begin{vmatrix} E - E_M & V_{MN} \\ V_{MN} & E - E_N \end{vmatrix} = 0 \quad (2.2)$$

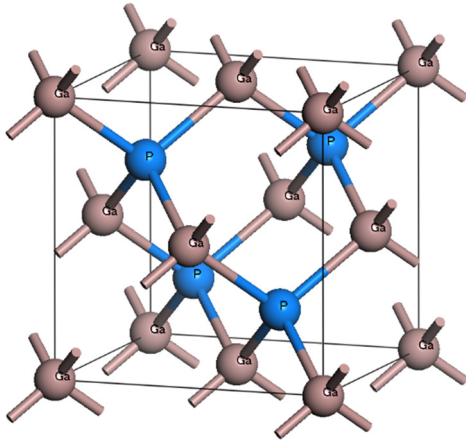
$$V_{MN} = -C_{MN} \sqrt{x} \quad (2.3)$$

$$E_{\pm} = \frac{(E_N + E_M) \pm \sqrt{(E_N - E_M)^2 + 4V_{MN}^2}}{2} \quad (2.4)$$

Burada  $E_M$ , III-V yarıiletkenin iletkenlik bandı kenarının enerjisi,  $E_N$  lokalize azot seviyesinin enerjisi,  $V_{MN}$  ise matris elementi çiftlenimini ifade etmektedir. Ayrıca  $V_{MN}$ ,  $x$  azot alaşım oranı,  $C_{MN}$  lokalize azot seviyesi ile III-V yarıiletkenin iletkenlik bandı arasındaki etkileşim sabiti olmak üzere Eş. 2.3 ile belirlenir. Eş. 2.2 çözüldüğünde  $E_+$  ve  $E_-$  enerji özdeğerleri Eş. 2.4 ile hesaplanır [21].

## 2.5. GaP Yarıiletken Bileşiği

Galyum fosfat (GaP), periyodik tablonun IIIA grubunda bulunan Galyum (Ga) ve VA grubunda bulunan Fosfor (P) elementlerinin bileşiminden oluşan III-V grubu yarıiletken bileşiktir. GaP kristali, çinko sülfür (zinc blende) yapıdadır (Şekil 2.12). GaP'nin oda sıcaklığındaki bazı özellikleri Çizelge 2.3'de verildi.



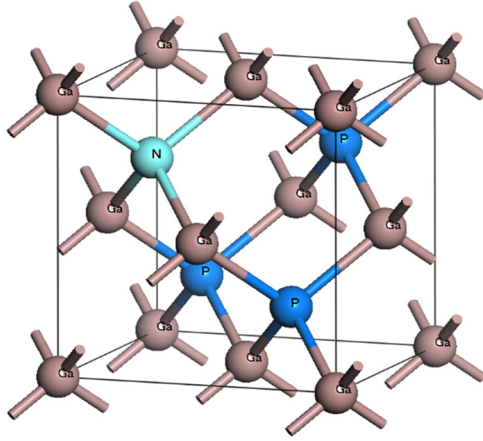
Şekil 2.12. GaP yarıiletkeninin kristal yapısı

Çizelge 2.3. GaP'nin oda sıcaklığında bazı özellikleri [24]

| Özellik                                       | Parametre                      |
|-----------------------------------------------|--------------------------------|
| Kristal yapısı                                | Çinko sülfür                   |
| Yasak enerji aralığı (eV)                     | 2,78 (direkt), 2,26 (indirekt) |
| Örgü sabiti (Å)                               | 5,4505                         |
| Termal genleşme katsayısı ( $10^{-6}K^{-1}$ ) | 4,65                           |
| Isıl iletkenliği (W/cm K)                     | 1,10                           |
| Kırılma indisi                                | 3,02                           |

## 2.6. Seyreltik Azotlu GaPN Yarıiletken Alaşımı

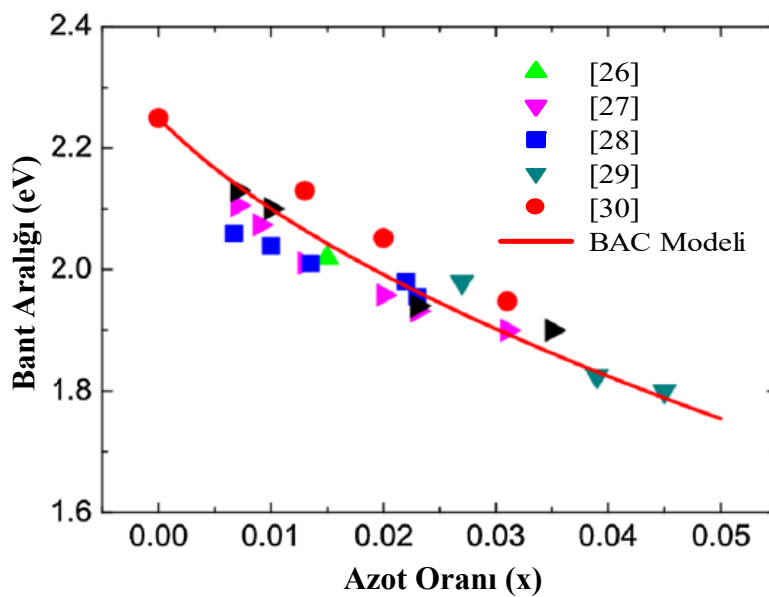
Seyreltik azotlu galyum fosfat nitrat (GaPN) yarıiletkeni, IIIA grubunda Galyum (Ga), VA grubundan Fosfor (P) ve Azot (N) atomlarından oluşan bir alaşımdır. Azot, GaP kristal örgüsündeki diğer VA grubu elementi olan P atomlarından bazılarının yerine geçer. N ve P atomları, örgüde VA grubu atomlarının yerleşeceği örgü noktalarını alaşım oranlarına göre paylaşır. GaPN kristali, GaP gibi çinko sülfür (zinc blende) yapıdadır (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. GaPN yarıiletken alaşımasının kristal yapısı

Yapıya eklenen azot, diğer seyreltik azotlu yarıiletkenlerde olduğu gibi GaP'ın yasak enerji aralığında ve örgü sabitinde azalmaya neden olur. GaPN alaşımasının azot oranına göre yasak enerji aralığı değişimi Şekil 2.14'de verildi. Ayrıca indirekt yasak enerji aralığına sahip olan GaP yarıiletkeni, azot alaşım oranı  $x > 0,005$  iken direkt yasak enerji aralığı özelliği göstermektedir [25].

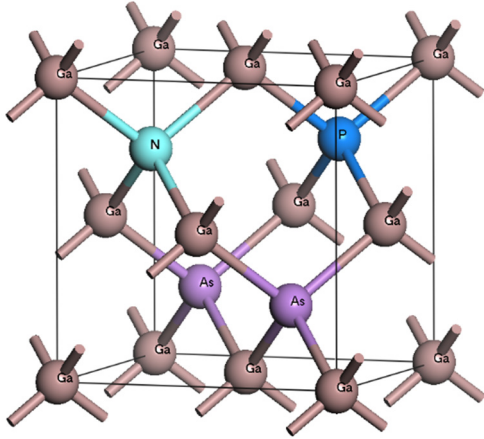
GaPN alaşımasının bant enerjileri ( $E_+$  ve  $E_-$ ), BAC modeli kullanılarak Eş. 2.4 ile hesaplanabilir. Burada GaPN alaşımına ait parametreler  $C_{MN} = 3,05$  ve  $E_N = 2,18 \text{ eV}$  olarak verilir [25].



Şekil 2.14. Seyreltik azotlu GaPN alaşımında azot oranı-bant aralığı ilişkisi [31]

## 2.7. Seyreltik Azotlu GaAsPN Yarıiletken Alaşımı

Seyreltik azotlu galyum arsenik fosfat nitrat (GaAsPN) yarıiletkeni, IIIA grubundan Galyum (Ga), VA grubundan Arsenik (As), Fosfor (P) ve Azot (N) atomlarından oluşan bir alaşımdır [20]. N, P ve As atomları, örgüde VA grubu atomlarının yerleşeceği örgü noktalarını alaşım oranlarına göre paylaşır. GaAsPN kristali, GaP gibi çinko sülfür (zinc blende) yapıdadır (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. GaAsPN yarıiletken alaşımının kristal yapısı

Dörtlü alaşım yapıya sahip olan seyreltik azotlu GaAsPN yarıiletkeninin fiziksel özellikleri, yapıdaki N, P ve As alaşım oranlarına göre farklılık gösterir. Diğer seyreltik azotlu yarıiletkenlerde olduğu gibi GaAsPN alaşımında da artan azot oranı, örgü sabiti ve yasak enerji aralığında azalmaya neden olur. GaAsPN alaşımının bant enerjileri, Eş. 2.4 ve Eş. 2.5 kullanılarak hesaplanır [32].

$GaP_{1-x-y}As_yN_x$  alaşımının bant enerjileri,

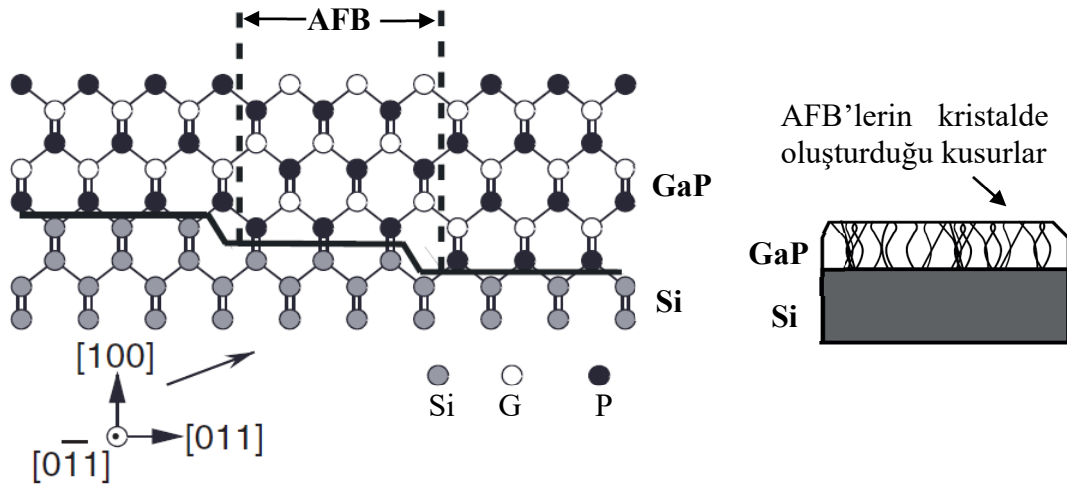
$$E_{\pm} = (1-x-y)[E_{\pm}(GaP_{1-x}N_x)] + (x+y)[E_{\pm}(GaAs_{1-x}N_x)] + b_{GaAsP}(1-x-y)(x+y) \quad (2.5)$$

denklemleri ile hesaplanır. Burada,  $b_{GaAsP} = -0,21$  eV, GaAsN için parametreler  $C_{MN} = 2,7$  ve  $E_N = 1,65$  eV olarak verilir [32].

## 2.8. Si Alttaşı Üzerine GaP Büyütülmesi

Silikon (Si), yarıiletken endüstrisinde en yaygın kullanılan malzemelerin başında gelmektedir. Bileşik ve alaşım yarıiletkenlerle kıyaslandığında daha kolay elde edilmesi, üretim maliyetinin daha az olması ve üzerindeki bilgi birikiminin oldukça fazla olması, silikonu yarıiletken teknolojiler alanında vazgeçilmez yapmaktadır [33]. Fakat silikon, indirekt yasak enerji aralığına sahip olması, yasak enerji aralığının görünür bölgenin uzağında kalması, düşük elektron mobilitesi ve düşük kuantum verimliliği nedeniyle, optoelektronik aygıt üretiminde III-V ve II-VI grubu yarıiletkenlerinin gerisinde kalmaktadır [12, 34]. III-V grubu yarıiletkenlerin üstün fiziksel özellikleri ve aygıt üretim potansiyelleri ile silikonun düşük maliyetini bir araya getiren silikon tabanlı optoelektronik entegre devrelere (OEIC) yönelik çalışmalar son yıllarda hız kazanmıştır [34]. Ayrıca Si üzerine örgü uyumlu olarak büyütülebilen seyreltik azotlu GaPN ve GaAsPN yarıiletkenleri, Si tabanlı LED, SC, LD ve PD yapılarının üretimini mümkün kılmaktadır [35].

Si üzerine GaP büyütülmesi, III-V/Si yapıları örnektir. Silikonun örgü sabiti ( $5,431 \text{ Å}$ ) ile GaP örgü sabiti ( $5,451 \text{ Å}$ ) birbirine yakın olmasına rağmen, Si-GaP arayüzeyinde anti-faz bölgeler (AFB) oluşmaktadır (Şekil 2.16). AFB oluşumu, IVA grubu yarıiletkenler üzerine III-V grubu yarıiletkenlerin büyütülmesinde karşılaşılan bir durumdur. Bu problemin kaynağı, IVA grubu elementleri ile III-V grubu bileşimler arasındaki örgü simetrisi farklılığıdır [34].



Şekil 2.16. GaP/Si büyütmesinde AFB oluşumu [34]

Büyütme sırasında oluşan AFB'ler örgüyü her iki tarafta bükülmeye maruz bırakarak, örgüde kaymalara ve dizilme kusurlarına neden olur. Örgüde oluşan bükülme ve kaymalar ise yapısal kusurlar oluşturur [36]. GaP/Si büyütmelerinde meydana gelen AFB'lerin neden olduğu yapısal kusurlar, bu malzemelerden üretilecek aygıtların performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle AFB'lerin oluşumunu engellemek için farklı yöntemler kullanılmaktadır.

- 1) (100) yönelimli Si alttaşın [110] doğrultusu boyunca belirli bir açıyla (örneğin 2°, 4°, 6°) kesilmesiyle elde edilen Si alttaş yüzeyine GaP büyütülerek, Si-GaP arayüzeyinde AFB oluşumu engellenebilir [37].
- 2) Arayüzeyde daha düzgün bir kristallenme sağlanması için Si üzerinde GaP büyütülmeden önce;
  - a) Yüzeye P atomları gönderilerek daha düzgün GaP-Si arayüzeyi oluşturulmaktadır.
  - b) Ga ve P atomlarının ardışık olarak tek katman halinde birikimi ile oluşturulan çekirdekleşme yöntemi kullanılmaktadır [36]. Bu büyütme tekniği, düşük sıcaklıkta ardışık olarak yüzeye gönderilen Ga ve P atomlarının yüzeydeki göçü/yerleşimi kontrolüne dayanan epitaksiyel büyütme tekniğidir (migration enhanced epitaxy, MEE) [38].
- 3) Si üzerine GaP büyütüldükten sonra adım artımlı olarak sıcaklığın artırılması ve bu sıcaklıkta yapının belirli bir süre tavlama (step-graded thermal annealing), arayüzeyde oluşan kusurların giderilmesi için kullanılan bir başka yöntemdir [39].
- 4) Si (100)'ın bir atomik basamaklı yüzeyi, üzerine büyütülen III-V grubu yapıda dizilme kusurları yaratarak AFB oluşumuna neden olmaktadır. Yüksek sıcaklıkta yapılan tavlama işlemi (~1000°C), yüzeydeki basamaklı yapıyı iki atomik basamağa çıkartarak dizilme kusurlarını engellemekte ve AFB oluşumunu azaltmaktadır [39].

Bu tez çalışmasında, Si-GaP arayüzeyinde meydana gelen kusurların giderilmesi ve yüksek kristal kalitesine ulaşılabilmesi için kullanılan ilk üç yöntemde denendi ve en uygun yöntem belirlendi.

### 3. BÜYÜTME ve KARAKTERİZASYON TEKNİKLERİ

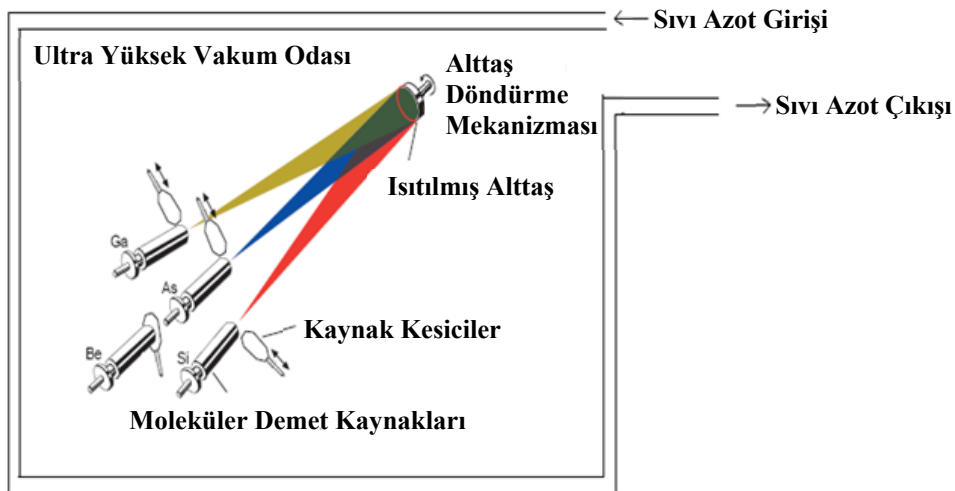
Bu bölümde, tez çalışmasında incelenen kalibrasyon numuneleri ve p-n eklem yapıların büyütülmesinde ve analizlerinde kullanılan deneysel yöntemler, kullanım amaçlarına yönelik olarak tanıtıldı.

#### 3.1. Büyütme Teknikleri

Bu tez çalışmasında kullanılan seyreltik azotlu yarıiletken malzemeler, Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi (Gazi-FOTONİK) bünyesinde bulunan katı kaynaklı V80H Moleküler Demet Epitaksi (MBE) sisteminde üretildi.

##### 3.1.1. Moleküler demet epitaksi (MBE) sistemi

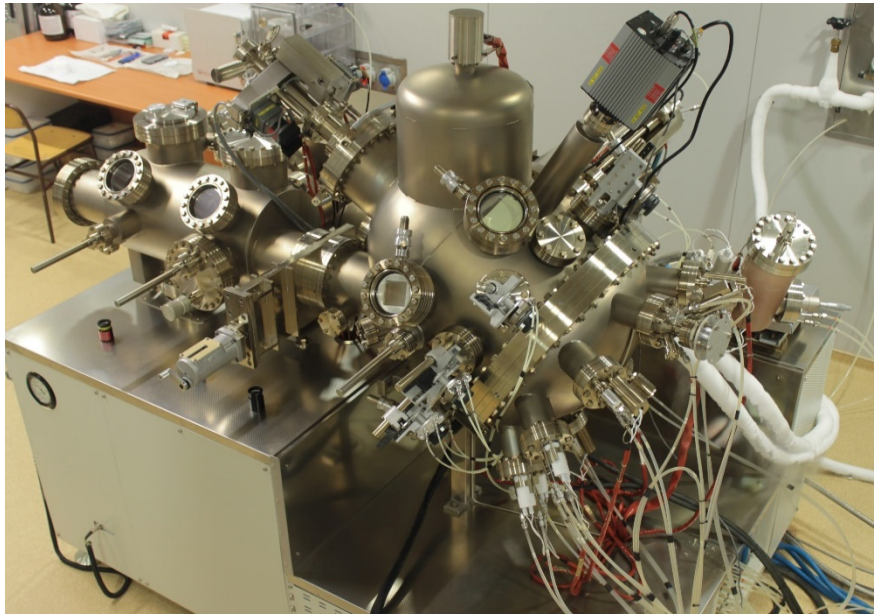
Moleküler Demet Epitaksi (Molecular Beam Epitaxy, MBE) tekniği, ultra yüksek vakumda ( $\sim 10^{-10}$  mbar) buharlaştırma tekniğidir. Bu teknik, yüksek kalitede ince film tek kristal büyütme için geliştirilmiş en ideal yöntemlerden bir tanesidir [38]. Termal Knudsen kaynaklarında uygun elementlerin buharlaştırılmasıyla üretilen moleküler demetler, ısıtılmış bir alttaş üzerine gönderilerek tek kristal katmanların oluşması sağlanır. Temel olarak MBE işleminin şeması Şekil 3.1’de verildi.



Şekil 3.1. MBE tekniğinin şematik gösterimi [40]

MBE tekniğinde büyütme oranı, diğer epitaksiyel büyütme tekniklerine göre oldukça düşüktür. Bu düşük büyütme oranı, istenilen bileşim ve katkı atomu oranının ayarlanabilmesini sağlar. Kaynak kesicilerin hareketini 1 saniyeden daha kısa bir sürede tamamlaması, büyütmenin kontrolü için oldukça önemlidir. MBE tekniğinde büyütme sıcaklığı, diğer tekniklere göre daha düşüktür. Bu, birbiri üzerine büyütülen tabakalar arasında meydana gelebilecek difüzyonun engellenmesini sağlar. Ayrıca, büyütme odasına eklenebilecek farklı analiz sistemleri ile büyütme işleminden önce, büyütme işlemi sırasında veya büyütme işleminden sonra epitaksiyel katmanların kimyasal ve yapısal özellikleri belirlenebilir. Günümüz teknolojisinde büyütme işlemi sırasındaki bütün parametreler bilgisayarlar yardımıyla tam olarak kontrol edilebildiğinden, büyütme işlemi eksiksiz olarak yapılabilmektedir.

*VG-Semicon V80H-MBE sistemi:* Gazi-FOTONİK’de kurulu VG-Semicon V80H-MBE Sisteminin resmi Resim 3.1’de ve şematik gösterimi Şekil 3.2’de verildi. Bu sistem, IIIA grubundan Ga, In, Al kaynaklarına VA grubundan As, P, N ve katkı olarak kullanılan Si, Be kaynaklarına sahiptir.



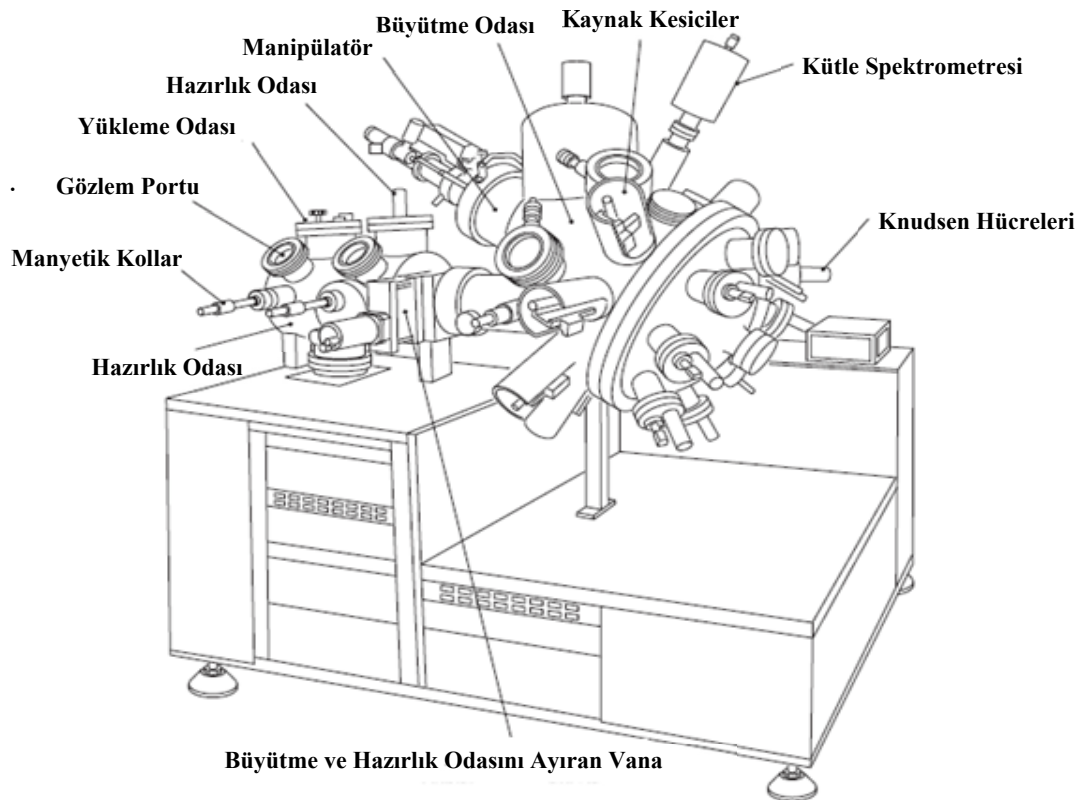
Resim 3.1. Gazi-FOTONİK’de bulunan VG-Semicon V80H MBE sistemi

MBE sistemi kısaca, büyütme odasını, yükleme odasını, hazırlık odasını, transfer mekanizmasını ve bilgisayara bağlı elektronik kontrol ünitesini içermektedir. Yükleme, hazırlık ve büyütme odası ultra yüksek vakum şartları altında tutulmaktadır. Büyütme

odasında, alttaşı ısıtıcısı, homojenlik sağlamak için alttaşı döndürücü, alttaşı yüklemek ve transfer yapabilmek için hareket edebilen magnetler, kaynak hücreleri, kaynak kesicileri, RHEED (Yüksek Enerjili Elektron Yansıma Kırınımı) cihazının bileşenleri, kütle spektrometresi, akı ölçümü için iyon sayacı ve gözlem pencereleri bulunmaktadır.

Hazırlık odasında, transfer mekanizması, hareketli magnetler, yükleme odası ve ilk temizleme bölümü bulunmaktadır. Yükleme odası asansörlü sisteme sahiptir ve alttaşların kasetlik denilen raflara dizildiği kısmı içermektedir. Uygun vakum şartlarında kaset asansörü açılarak alttaşın hazırlık odasına yüklenmesi sağlanır.

Sistemin kontrolü bir elektronik kontrol ünitesi ve bir bilgisayar tarafından sağlanmaktadır. Isıtıcı ve kaynakların sıcaklıkları, kaynak kesicilerin hareketleri, alttaşın döndürülmesi bu bilgisayar yardımıyla devamlı kontrol edilmektedir. Büyütme odasında vakumu sağlayan iyon pompası, titanyum süblimleşme pompası, turbo moleküler pompa ve soğuk pompa (cryo pompa) mevcuttur. Büyütme odasının dış kısmını çevreleyen sıvı azot ile soğutulmuş yüzeyler tuzaklama ile vakumun yükselmesine katkı sağlar.



Şekil 3.2. VG-Semicon V80H-MBE sisteminin şematik gösterimi [40]

Bu tez çalışmasındaki seyreltik azotlu yarıiletken malzemeler, VG-Semicon V80H-MBE sisteminde, azot kaynağı olarak N RF-plazma kaynağı kullanılarak büyütüldü.

Diğer katı kaynaklardan farklı olarak azot, yüksek saflıkta (6N) gaz fazında ve N<sub>2</sub> formunda sisteme gönderilir. N<sub>2</sub> reaktif olmadığı için kırılarak (cracking) N formunda alttaş üzerine gönderilmelidir. N<sub>2</sub> ayrışma enerjisi (9,76 eV), oldukça yüksek olduğundan (As için 3,96 eV, P için 5,03 eV), As<sub>4</sub> ve P<sub>2</sub> moleküllerini kırmak için kullanılan yüksek sıcaklık bölgesi kırma hücreleri yerine radyo frekans (RF) plazma, elektron siklotron rezonans (ECR) plazma ve DC plazma kaynakları kullanılmaktadır [20]. Bu sistemler arasında RF plazma kaynağı yaygın olarak tercih edilmektedir. Radyo frekans (13,56 MHz), N<sub>2</sub> molekülünü, N atomu, iyonlar, elektronlar ve diğer serbest radikallere ayırır. Plazmadaki N atomları alttaş yüzeyinde diğer atomlarla (Ga, P, As, vb.) bağ yaparak seyreltik azotlu yapıyı oluşturur [20].

### 3.2. Yapıların Karakterizasyonları

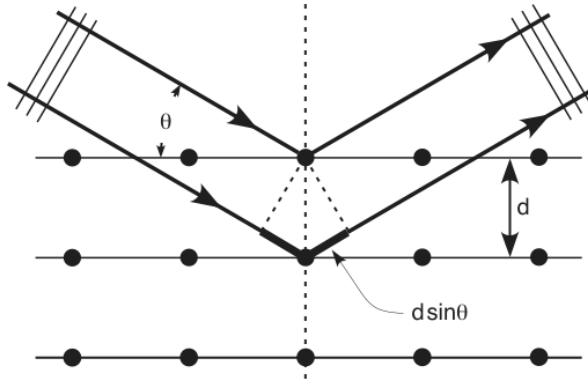
MBE tekniği ile büyütülen numunelerin yapısal, elektriksel ve optik analizleri aşağıdaki sistemler ve uygun yöntemler kullanılarak gerçekleştirildi.

#### 3.2.1. Yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı (HRXRD)

Kırınım deneyleri, kristal malzemelerin yapısal özelliklerini belirlemek için kullanılan tekniklerdir. X-ışını kırınımı (XRD), büyütülen tabakaların kalınlığını, çoklu yapıların alaşım oranlarını, ince filmlerde oluşan gerginliği ve kusur tiplerini belirlemeye yarayan çok yönlü bir deneysel tekniktir. XRD'nin çalışma prensibi kristaldeki örgü parametreleri ile aynı mertebede dalgaboyuna sahip X-ışını dalgalarının kristalde kırınımına uğraması olayına dayanır [41]. Bütün kırınım deneylerinin temeli Şekil 3.3'de gösterilen Bragg kanununa dayanır ve Eş. 3.1 ile verilir.

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (3.1)$$

Burada  $d$  özdeş düzlemler arasındaki uzaklık,  $\theta$  kırınım açısı ve  $\lambda$  dalgaboyudur.



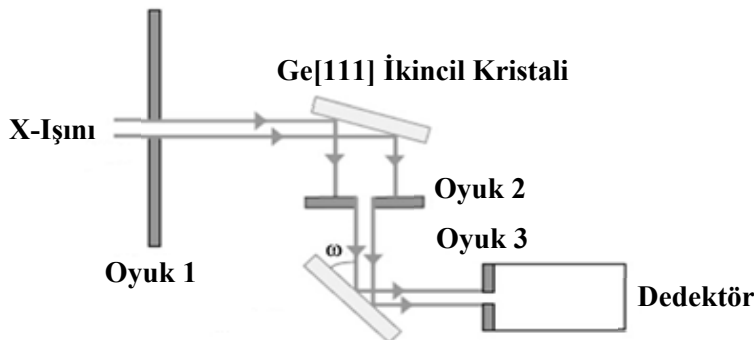
Şekil 3.3. Kristal düzlemlerinden X-ışınlarının saçılması [41]

Birim hücresi  $a$  örgü parametresi ile tanımlanan kübik yapı bir kristal için düzlemler arasındaki uzaklık ve örgü parametresi arasındaki ilişki Eş. 3.2 ile ifade edilir.

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (3.2)$$

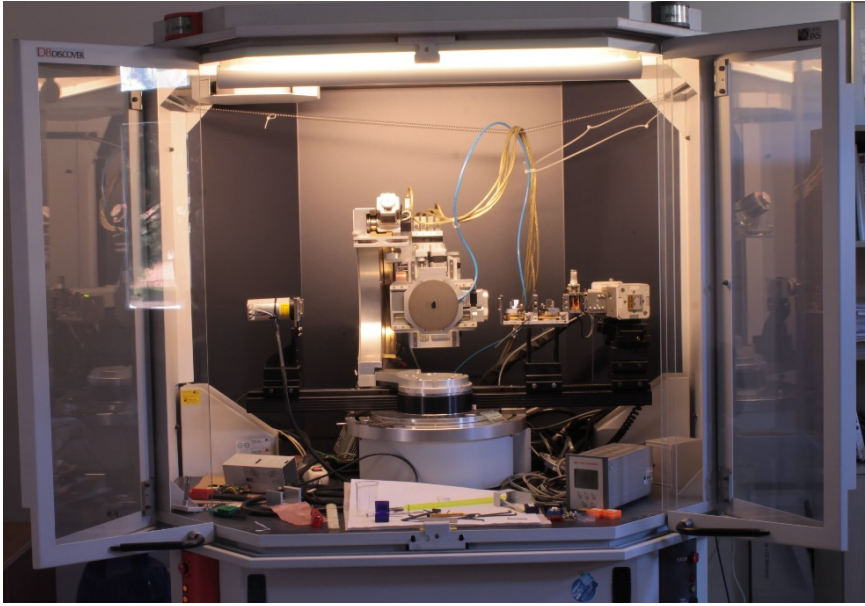
Burada  $h$ ,  $k$  ve  $l$  miller indisleridir. Bu temel eşitlikler kullanılarak yapılan analizler, malzeme hakkında detaylı yapısal bilgiler verir.

Çift veya dört kristalli monokromatör kullanılması, XRD analizlerinde kullanılan bir ölçüm tekniğidir. Bu ölçüm tekniğinin hassaslığı nedeniyle çoklu yapılarda oldukça sık kullanılır. Bu teknik için tipik bir ölçüm düzeneği Şekil 3.4’de verildi. X-ışını demeti ilk olarak monokromatördeki yüksek kaliteli bir kristale çarparak kırınımına uğrar. Kırınan demet örnek kristal üzerine düşer. Eğer iki kristal için Bragg açıları eşitse oldukça dar bir kırınım deseni gözlenir. Örnek kristalin geniş aralıkta yapısal dizilimini veren rocking-eğrilerini elde etmek için örnek kristal küçük bir  $\omega$  açısıyla döndürülür ve kırınan demet şiddeti kaydedilir [38].



Şekil 3.4. Yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınım düzeneği

Bu tez çalışmasında, Gazi-FOTONİK bünyesinde bulunan Bruker D8 Discover XRD cihazı ile X-ışını kırınım desenleri elde edildi. Elde edilen kırınım desenlerinin alıştırma oranı, dinamik kırınım teorisinin Takagi-Taupin denklemlerinin [42] çözümüne dayanan LEPTOS yazılımı [43] kullanılarak deneysel verilerin simüle edilmesi ile belirlendi. Bu cihaz Ge (220) yönelimli dört kristal monokromatöre ve X-ışını kaynağı olarak  $\text{CuK}\alpha 1$  ( $\lambda=1,540 \text{ \AA}$ )'e sahiptir. Cihazın genel görüntüsü Resim 3.2'de verildi.



Resim 3.2. Bruker D8 Discover XRD cihazının genel görünümü

### 3.2.2. Hall etkisi ölçüm sistemi

Hall etkisi ölçümü, günümüzde herhangi bir yarıiletken malzemenin elektriksel karakterizasyonunda kullanılan en önemli yöntemlerden biridir. Hall ölçümü, yarıiletken malzemenin taşıyıcı yoğunluğunun, taşıyıcı hareketliliğinin (mobilité), öz direncinin ve tipinin belirlenmesini sağlar [44].

Hall etkisinin fiziksel temeli Lorentz kuvvetidir. Bir elektron, uygulanan manyetik alana dik olarak hareket ederse hem hareket hem de manyetik alana dik olacak şekilde bir manyetik kuvvete maruz kalır ve bu kuvvet etkisiyle sapar. Sapmış elektronlar bir elektrik alan oluşturur ve oluşan elektrik alan etkisiyle de bir elektriksel kuvvet meydana gelir. Elektronlar, Lorentz kuvvetine maruz kalması nedeniyle yarıiletkenin her iki tarafında bir yük birikmesine neden

olacaktır. Bu yük birikimi Hall voltajı ( $V_H$ ) denilen bir voltaj oluşturur ve yarıiletkenin iki tarafı boyunca bir potansiyel farkı meydana getirir.  $V_H$ , Eş. 3.3 ile verilir.

$$V_H = \frac{IB}{nqd} \quad (3.3)$$

Burada  $I$  akım,  $B$  manyetik alan,  $d$  örneğin kalınlığı,  $q$  elektron yüküdür ve  $n$  taşıyıcı yoğunluğudur.

Hall ölçümünde kullanılan cihazlar, bir elektromıknatıs (500-5000 Gauss), sabit akım kaynağı (10  $\mu$ A-100 mA), 1  $\mu$ V ile 1 V arasını hassas ölçebilen bir voltmetre ve numune sıcaklığını hassas olarak ölçebilecek bir sıcaklık kontrol ünitesidir.

Bu tez çalışmasında, seyreltik azotlu yarıiletkenlerde taşıyıcı yoğunluklarının ayarlanabilmesi için büyütülen kalibrasyon numuneleri, Gazi-FOTONİK’de bulunan ve Resim 3.3’de gösterilen Lake-Shore 7700 serisi Hall etkisi ölçüm sistemi ile analiz edildi. Bu sistemde numune, kryostat içinde numune tutucuya yerleştirilir ve numune bobinlerin oluşturduğu manyetik alana dik olacak şekilde konumlandırılır. Sistemin kontrol ünitesinden malzemeye uygulanacak olan sabit akım, manyetik alan ve sıcaklık değerleri kontrol edilebilir. Kontrol sisteminin bağlı olduğu bilgisayar ölçüm verilerini alarak programa aktarır ve bu program sayesinde van der Pauw ve Hall etkisi ölçüm tekniklerini kullanarak gerekli olan hesaplamalar ile öz direnç ( $\rho$ ), Hall taşıyıcı yoğunluğu ( $n_H$ ) ve Hall katsayısı ( $R_H$ ) değerlerinin bulunmasını sağlar.

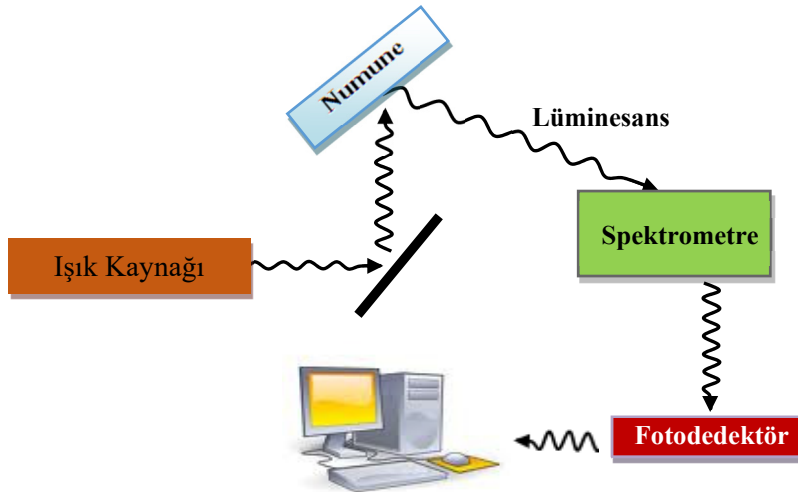


Resim 3.3. Lake Shore 7700 serisi Hall etkisi ölçüm sistemi

### 3.2.3. Fotolüminesans (PL)

Fotolüminesans spektroskopisi, yarıiletken malzemelerin elektronik yapılarını ve optik özelliklerini araştırmada kullanılan, malzemeye zarar vermeyen deneysel bir yöntemdir [38]. Fotolüminesans (PL), optik uyarma altındaki bir materyalden ışığın kendiliğinden yayılmasıdır. Işık, bir malzeme üzerine gönderildiğinde, malzeme enerji soğurur. Malzeme soğurulan bu enerjiyi kendiliğinden bir ışık yayarak salar. Bu süreçte malzemenin ışıkla uyarılmasına foto-uyarım, foto-uyarım sonucunda oluşan kendiliğinden ışımaya olayına fotolüminesans veya foto-ışımaya adı verilir. Foto-uyarım, malzeme içerisindeki elektronların izinli uyarılmış durumlara hareket etmesine neden olur. Bu elektronlar kendi denge durumlarına dönerken ışımalı ya da ışımasız geçişler yapar.

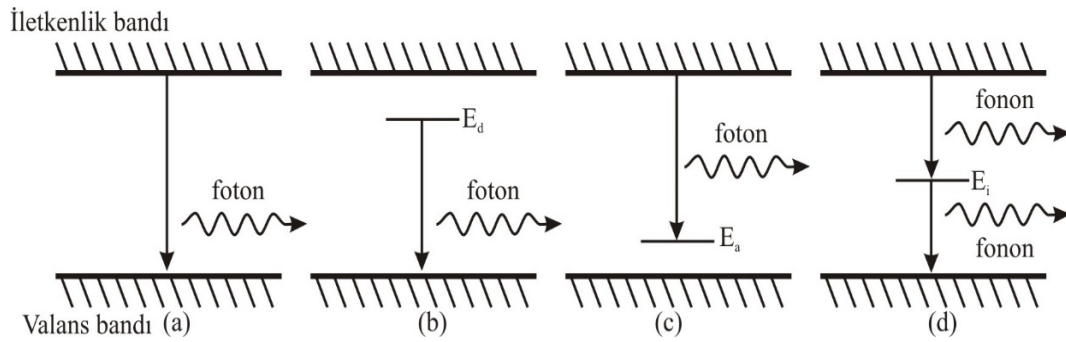
Yapılan ışımalı geçiş sonucunda malzemeden salınan fotonlar (optik sinyal) ayna sistemi ve monokromatör yardımıyla ayrıştırılarak dedektöre aktarılır. Dedektör yardımı ile elde edilen optik sinyal, elektriksel sinyale dönüştürülür. Malzemenin lüminesans ışımaya karşılık gelen bu sinyalin şiddet-dalgaboyu (veya enerji) grafiği çizilerek fotolüminesans spektrumu elde edilir. Bu spektrumun analizi ile malzeme hakkında, malzeme kalitesi, safsızlık ve katkı miktarı, yasak enerji bant aralığı ve arayüzey pürüzlülüğü bilgileri elde edilir. Tipik bir PL düzeneği şematik olarak Şekil 3.5’de verildi.



Şekil 3.5. Fotolüminesans (PL) ölçümü için tipik bir deneysel düzenek

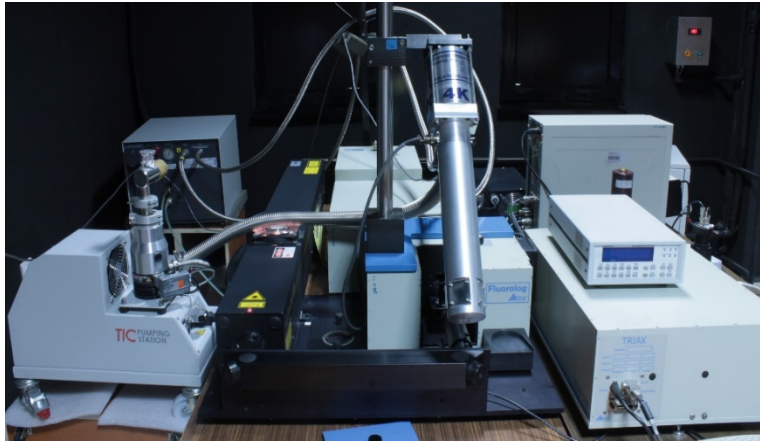
Bir yarıiletkenin fotolüminesans olayında üç temel süreç meydana gelir. Bu süreçler; Uyarılma, ilk olarak incelenen malzeme tek dalgaboylu optik uyarma kaynağı tarafından

uyarılır.  $h\nu$  kadar bir enerjiye sahip uyarıcı fotonlar elektronları valans bandından iletim bandına çıkartır. Optik uyarma kaynağının enerjisi yarıiletkenin yasak bant aralığından ( $E_g$ ) büyük olduğunda elektron-deşik çiftleri oluşur. Termalizasyon,  $h\nu \geq E_g$  için üretilen elektron-deşik çiftleri ilk anda yüksek bir kinetik enerjiye sahiptir. Bu fazla enerjilerini akustik ve optik fonon yayınımları yoluyla hızlı bir şekilde (0,2-100 ps) boşaltarak bant kenarlarına doğru hareket eder ve termal denge durumlarına ulaşırlar. Yeniden birleşme, elektron-deşik çiftleri yeniden birleşirler. Bu işlem sonucunda fazlalık enerji, ışımalı veya ışımasız olarak salınır. Lüminesans geçişlerinin şematik gösterimi Şekil 3.6’da verildi.



Şekil 3.6. (a-c) Işımalı geçişler: (a) banttan banda, (b) verici seviyesinden valans bandına (c) iletimlik bandından alıcı bandına, (d) bir orta seviyeden ışımasız geçiş

Bu tez çalışmasında büyütülen numunelerin PL ölçümleri, Gazi-FOTONİK’de bulunan Jobin Yuvon Florog-550 sistemi ile 50 mW gücündeki (325 nm) He-Cd lazer kullanılarak gerçekleştirildi. Kullanılan PL cihazı, Resim 3.4’de verildi. Numunelerin PL ölçümlerinden elde edilen spektrumlar yardımıyla lüminesans enerjileri belirlendi.



Resim 3.4. Jobin Yuvon Florog-550 PL ölçüm sistemi

### 3.3. Diyot Fabrikasyonu

Bu tez çalışmasında, büyütülen seyreltik azotlu p-n eklem yapıların diyot fabrikasyonları yapıldı ve akım-gerilim (I-V) özellikleri incelendi. Yapıların fabrikasyonu, metalizasyon süreçlerini içeren bir dizi işlem adımları ile gerçekleştirildi. Kontak oluşumu için farklı metalizasyon teknikleri kullanıldı. Kullanılan sistem ve yöntemler aşağıda sunulmuştur.

#### 3.3.1. Vakum-buharlaştırma (Evaporasyon) sistemi

Tez çalışmasında büyütülen numunelerin üzerinde AuZn ve AuNiGe alaşımlarıyla metal kontak oluşturulması işlemi, Gazi-FOTONİK’de bulunan ve Resim 3.5’de verilen BesTec marka vakum-buharlaştırma sistemi ile yapıldı. Sistem, maksimum 1 inç çaplı numunelere metal kaplamada kullanılmaktadır. Buharlaştırma işlemi, turbo moleküler pompa ile  $10^{-7}$  mbar basınca kadar inildikten sonra gerçekleştirilmektedir. Sistem, Au, Pt, Ni, Al gibi farklı metallerin ve AuZn, AuGe, AuNiGe gibi alaşımların uygulanan akımla buharlaştırılmasını ve numune yüzeyine kaplanmasını sağlamaktadır. Ayrıca buharlaştırma işlemi esnasında numuneler ısıtılabilmekte ve kaplama esnasında ohmik kontak oluşumu sağlanabilmektedir. Numune tutacağı döndürülebilir olup, homojen bir katman oluşmasını sağlamaktadır.

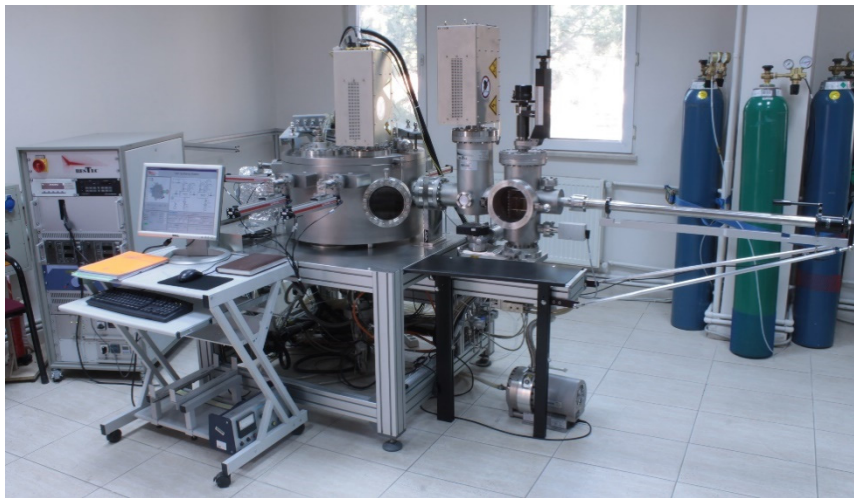


Resim 3.5. BesTec vakum-buharlaştırma (evaporasyon) sistemi

### 3.3.2. Püskürtme (Sputtering) sistemi

Püskürtme, alttaş (atomların ya da moleküllerin biriktirildiği malzeme) üzerine kaplanacak olan hedef malzemenin (atomların ya da moleküllerin koparıldığı malzeme) hedef yüzeyine çok yakın bir yerde oluşturulan plazma bulutuyla sökülen iyonlarla ya da yüksek enerjili yüksüz parçacıklarla bombardıman edilmesidir. Püskürtme işlemi sırasında meydana gelen olaylar basitçe şunlardır; yüksek enerjili iyonlar veya yüksüz parçacıklar oluşur ve kinetik enerji kazanıp hedefe yönelerek hedefe çarpar. Hedeften parçacıklar ve atomlar söker. Sökülen atomlar alttaşa yönelir ve yoğunlaşarak alttaşa yapışır. Püskürtme tekniği ile bu şekilde ince film oluşturulur.

Bu tez çalışmasında büyütülen numunelerin üzerinde Au metal kontak oluşturma işlemi, Gazi-FOTONİK’de bulunan ve Resim 3.6’da verilen BesTec marka püskürtme sistemi ile yapıldı. Sistem, 3 inç alttaşlara püskürtme yapabilmektedir, 2 RF ve 3 DC magnetron püskürtme kaynağına sahiptir. Sistem iki vakum odasından oluşmaktadır. Giriş odasında yükleme kasetliği ve ters püskürtme sistemi bulunur. Ters püskürtme, plazma ile yüzeyden aşındırma yaparak yüzey temizliği sağlamada kullanılır. İkinci oda ise silindirik biçimli olup, püskürtme kaynakları ve silindirik koordinatlarda hareket edebilen numune tutacağından oluşmaktadır. Sistemin temel basınç değeri  $10^{-8}$  mbar civarındadır. Sistemde çeşitli maskeler kullanarak kaplama işlemi yapılabilmektedir.

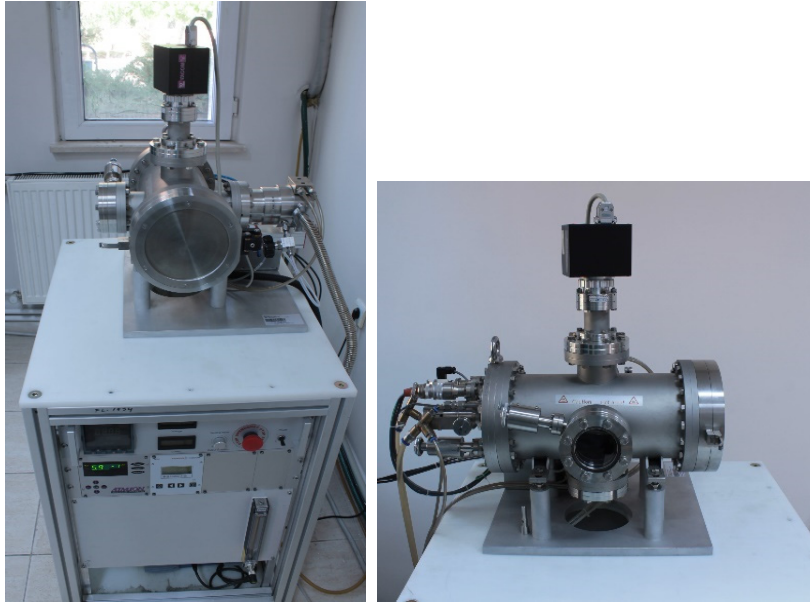


Resim 3.6. BesTec püskürtme (sputtering) sistemi

### 3.3.3. Hızlı ısıt tavlama (RTA) sistemi

Hızlı ısıt tavlama (RTA) sistemi, çeşitli gaz ortamlarında (N, Ar vb.) sahip olduğu halojen lambalı ısıtıcı ile yüksek sıcaklıklara (1000 °C) hızlı bir şekilde çıkabilen ve hızla soğumaya imkan tanıyan bir tavlama fırınıdır. Sisteme bağlı turbo moleküler pompa ile tavlama işlemi  $10^{-8}$  mbar mertebelerindeki vakum ortamında gerçekleştirilmektedir.

Bu tez çalışmasında, vakum-buharlaştırma tekniği ve püskürtme tekniği ile metal kontaktları oluşturulan numuneler RTA sisteminde tavlamanarak metal kontaktların ohmikleştirilmesi sağlandı. Gazi-FOTONİK’de bulunan RTA sistemi Resim 3.7’de verildi.



Resim 3.7. Hızlı ısıt tavlama (RTA) sistemi

### 3.3.4. Akım-Gerilim (I-V) ölçüm sistemi

Bu tez çalışmasında, MBE tekniği ile büyütülen, püskürme ve vakum-buharlaştırma teknikleri ile ohmik kontaktları oluşturulan p-n eklem yapıların akım-gerilim (I-V) ölçümleri, Gazi-FOTONİK’de bulunan ve Resim 3.8’de verilen Keithley 4200-SCS sistemi ile yapıldı.

Yarıiletken karakterizasyon sistemi olarak kullanılan 4200-SCS model Keithley marka sistem ile elektriksel ölçümler yapılabilmektedir. Sistemin maksimum gücü 1 A-20 W ve minimum gücü ise 100 mA-2 W olarak ayarlanabilmektedir.



Resim 3.8. Keithley 4200 yarıiletken karakterizasyon sistemi

Malzemeye uygulanan farklı gerilimler altında akım, kapasitans ve kondüktans ölçümleri ile materyalin dielektrik özellikleri, enerji band aralığı, ara yüzey durumların sayısı,  $I_0$  doyma akımı, bariyer yüksekliği, taşıyıcı yoğunluğu (kalınlığa bağlı), iletkenlik, öz direnç, idealite faktörü, seri direnç gibi birçok fiziksel parametresi hesaplanabilmektedir. Işıқта ve karanlıkta I-V karakteristikleri ölçülebilmektedir. Ölçüm sırasında çoklu I-V veya C-V grafiklerini karşılaştırmalı olarak görüntülenebilmektedir. Numune tutucu ölçüm istasyonu, I-V/C-V testleri yapılacak örneğin kontak bağlamaları için ölçüm istasyonunda 4 ayrı test bağlantı teli ve altın kaplama uçlu bacakları olan yaylı pimler (numuneye zarar vermeyecek şekilde) bulunmaktadır. Ayrıca ölçüm istasyonu farklı sayıda ve boyuttaki test hücrelerinin yerleşimi için ayarlanabilmektedir.



#### 4. YAPILARIN BÜYÜTÜLMESİ ve KARAKTERİZASYONLARI: BULGULAR ve TARTIŞMA

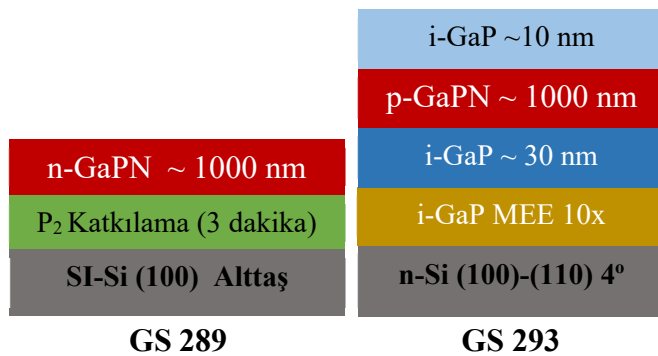
Bu tez çalışmasında, Si ve GaP alttaşlar üzerine seyreltik azotlu GaPN ve GaAsPN yarıiletken p-n eklem yapılarının MBE tekniği kullanılarak yüksek kristal kalitesinde büyütülmesi ve özelliklerinin incelenmesi amaçlandı. Bu amaçla ilk olarak, oluşturulacak seyreltik azotlu p-n eklem yapıların taşıyıcı yoğunluklarının istenilen seviyede ayarlanabilmesi için iki adet katkı kalibrasyon numunesi büyütüldü ve karakterize edildi. Ardından, n-GaP alttaş üzerine seyreltik azotlu p-GaPN ve p-GaAsPN yapıları büyütülerek farklı tür p-n eklemler oluşturuldu ve karakterizasyonları yapıldı. Si üzerine GaP büyütmesini geliştirebilmek ve yüksek kristal kalitesinde GaP/Si elde edebilmek için iki farklı yöntem kullanılarak kalibrasyon numuneleri büyütüldü. Son olarak, Si ve GaP alttaşlar üzerine p-n eklem GaAsPN yapıları büyütüldü ve karakterizasyonları yapıldı.

##### 4.1. Yapıların Büyütülmesi

Tüm numuneler, Gazi-FOTONİK bünyesinde bulunan katı kaynaklı V80H Moleküler Demet Epitaksi (MBE) sisteminde, N-RF plazma kaynağı kullanılarak büyütüldü.

##### 4.1.1. Katkı kalibrasyon numunelerinin büyütülmesi

Bu tez kapsamında, seyreltik azotlu numunelerde taşıyıcı yoğunluklarının belirlenmesi amacıyla, Si alttaş üzerine iki farklı yöntem kullanılarak p-tipi ve n-tipi olarak katkılanmış GaPN yapıları büyütüldü. Numuneler, GS289 ve GS293 olarak isimlendirildi. Numunelerin büyütme şekilleri Şekil 4.1’de verildi.



Şekil 4.1. GS289 ve GS293 numunelerinin büyütme şekilleri

GS289 numunesinde, SI-Si alttaş üzerine 3 dakika boyunca  $P_2$  akısı gönderildi ve n-tipi seyreltik azotlu GaPN yapısı büyütüldü. GS293 numunesinde ise n-Si (100) alttaşın [110] doğrultusu boyunca  $4^\circ$  açıyla kesilmesiyle elde edilmiş alttaş üzerine MEE yöntemi ile GaP büyütüldükten sonra p-tipi seyreltik azotlu GaPN yapısı büyütüldü.

GS289 ve GS293 katkı kalibrasyon numunelerinin büyütme şartları, sıralı adımlar halinde aşağıda verildi.

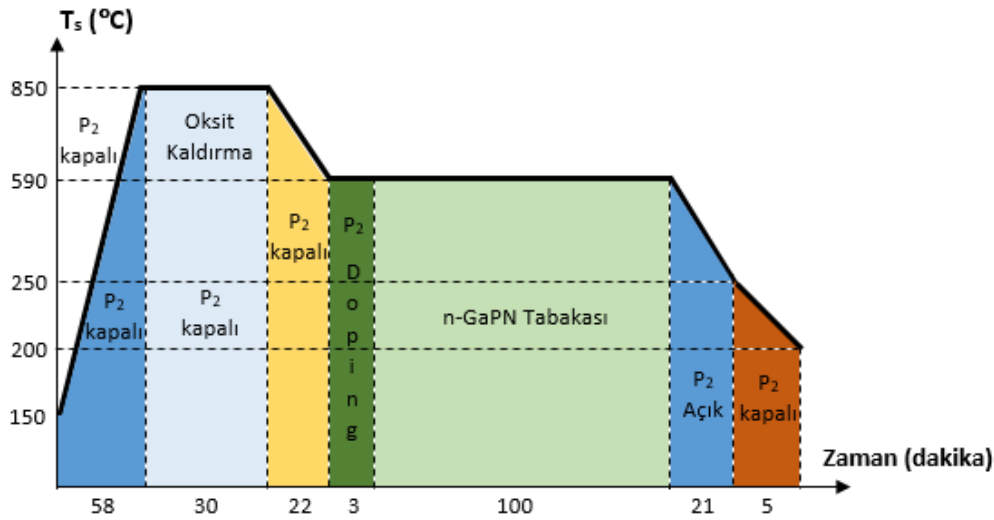
GS289 numunesinin büyütme adımları;

- a) SI-Si alttaş MBE sistemine yüklenmeden önce, üzerinde bulunabilecek oksit tabakası kimyasal olarak yüzeyden kaldırıldı. Ardından alttaş, aseton, alkol ve DI-H<sub>2</sub>O ile temizlenerek N<sub>2</sub> ile kurutuldu.
- b) Kimyasal temizlik işlemleri tamamlanan alttaş, bekletilmeden MBE sisteminin yükleme odasına yerleştirildi.
- c) Alttaş, büyütme odasına transfer edilmeden önce hazırlık odasında 400 °C’de 1,5 saat ısıtılarak üzerindeki su buharı ve alttaştan buharlaşabilen diğer kirliliklerin temizlenmesi sağlandı.
- d) Alttaş büyütme odasına transfer edilerek manipülatöre yüklendi.
- e) Sıvı azot paneli doldurulduktan sonra sıvı azot akışı büyütme süresinde sabit kalacak şekilde ayarlandı.
- f) Büyütmede kullanılacak kaynak hücreler (Ga, GaP, Si) düşük sıcaklık artışlarıyla (6 °C/dakika) ısıtılmaya başlandı. Hücre sıcaklıkları Çizelge 4.1’de verildi.
- g) Ga akısı, MIG yardımıyla istenilen büyütme oranına ulaşabilmek için kalibre edildi.
- h) Büyütme işlemi için takip edilecek adımlar V80H MBE sisteminde kullanılan Crystal programına yüklendi.
- i) Alttaş üzerinde bulunan oksit tabakasının kaldırılması için alttaş 10% rpm hızında döndürülerek, 800 °C’ye kadar ısıtılmaya başlandı.
- j) Alttaş sıcaklığı 800 °C’ye geldikten sonra RHEED penceresinden desene bakıldığında oksit tabakasının kalkmaya başladığı, desendeki belirginleşmeden anlaşıldı. Alttaş sıcaklığı kontrollü olarak 850 °C’ye çıkartıldı ve oksit tabakasının tamamen kalkması için bu sıcaklıkta 30 dakika beklendi. Bu işlem sonunda RHEED deseninin netleşmesiyle, beklenen kristal yapı düzeni gözlemlendi. Sonuç olarak oksit tabakasının tamamen kaldırıldığı sonucuna varıldı.

- k) Oksit tabakası kaldırıldıktan sonra, alttaş sıcaklığı 590 °C'ye düşürüldü. GaP hücresinin kaynak kesicisi 3 dakika açılarak, P<sub>2</sub> akısı alttaş yüzeyine gönderildi.
- l) Yüksek saflıkta N<sub>2</sub> gaz akışı ve N-RF plazma kaynağının gücü ayarlandı. Çizelge 4.1'de verilen parametreler kullanılarak n-GaPN tabakası büyütüldü. GS289 numunesinin büyütme grafiği Şekil 4.2'de verildi.

Çizelge 4.1. GS289 numunesinin büyütme parametreleri

|              |                                       |
|--------------|---------------------------------------|
| $T_{Alttaş}$ | 850 °C (Oksit Kaldırma)               |
|              | 590 °C (Diğer Tabakalar)              |
| $T_{Ga}$     | 837,6 °C                              |
| $T_{GaP}$    | 1040 °C                               |
| $T_{Si}$     | 1150 °C                               |
| $N-plazma$   | 0,4 sccm ( $1,2 \times 10^{-5}$ mbar) |
|              | P= 280 W                              |



Şekil 4.2. GS289 numunesinin büyütme grafiği

GS293 numunesinin büyütme adımları;

- a) n-Si(100)-(110) 4° alttaş MBE sistemine yüklenmeden önce, üzerinde bulunabilecek oksit tabakası kimyasal olarak yüzeyden kaldırıldı. Ardından alttaş, aseton, alkol ve DI-H<sub>2</sub>O ile temizlenerek N<sub>2</sub> ile kurutuldu.
- b) Kimyasal temizlik işlemleri tamamlanan alttaş, bekletilmeden MBE sisteminin yükleme odasına yerleştirildi.

- c) Alttaş, büyütme odasına transfer edilmeden önce hazırlık odasında 400 °C’de 1,5 saat ısıtılarak üzerindeki su buharı ve alttaştan buharlaşabilen diğer kirliliklerin temizlenmesi sağlandı.
- d) Alttaş büyütme odasına transfer edilerek manipülatöre yüklendi.
- e) Sıvı azot paneli doldurulduktan sonra sıvı azot akışı büyütme süresinde sabit kalacak şekilde ayarlandı.
- f) Büyütmede kullanılacak kaynak hücreler (Ga, GaP, Be) düşük sıcaklık artışlarıyla (6 °C/dakika) ısıtılmaya başlandı. Hücre sıcaklıkları Çizelge 4.2’de verildi.
- g) Ga akışı, MIG yardımıyla istenilen büyütme oranına ulaşabilmek için kalibre edildi.
- h) Büyütme işlemi için takip edilecek adımlar V80H MBE sisteminde kullanılan Crystal programına yüklendi.
- i) Alttaş üzerinde bulunan oksit tabakasının kaldırılması için alttaş 10% rpm hızında döndürülerek, 850 °C’ye kadar ısıtılmaya başlandı.
- j) Alttaş sıcaklığı 850 °C’ye geldikten sonra RHEED penceresinden desene bakıldığında oksit tabakasının kalkmaya başladığı, desendeki belirginleşmeden anlaşıldı. Alttaş sıcaklığı kontrollü olarak 900 °C’ye çıkartıldı ve oksit tabakasının tamamen kalkması için bu sıcaklıkta 15 dakika beklendi. Bu işlem sonunda RHEED deseninin netleşmesiyle, beklenen kristal yapı düzeni gözlemlendi. Sonuç olarak oksit tabakasının tamamen kaldırıldığı sonucuna varıldı.
- k) Oksit tabakası kaldırıldıktan sonra, alttaş sıcaklığı 590 °C’ye düşürüldü. MEE yöntemi kullanılarak yüzeye ardışık olarak Ga ve P atomları gönderildi. Bu işlem, Ga ve GaP kaynak kesicilerinin ardışık hareketleri ile 10 kez tekrarlandı.
- l) Yüksek saflıkta N<sub>2</sub> gaz akışı ve N-RF plazma kaynağının gücü ayarlandı. Çizelge 4.2’de verilen parametreler kullanılarak p-GaPN tabakası büyütüldü. GS293 numunesinin büyütme grafiği Şekil 4.3’de verildi.

Çizelge 4.2. GS293 numunesinin büyütme parametreleri

|              |                                       |
|--------------|---------------------------------------|
| $T_{Alttaş}$ | 900 °C (Oksit Kaldırma)               |
|              | 590 °C (Diğer Tabakalar)              |
|              | 350 °C (GaP MEE)                      |
| $T_{Ga}$     | 828 °C                                |
| $T_{GaP}$    | 1040 °C                               |
| $T_{Be}$     | 850 °C                                |
| $N-plazma$   | 0,4 sccm ( $1,2 \times 10^{-5}$ mbar) |
|              | P= 280 W                              |

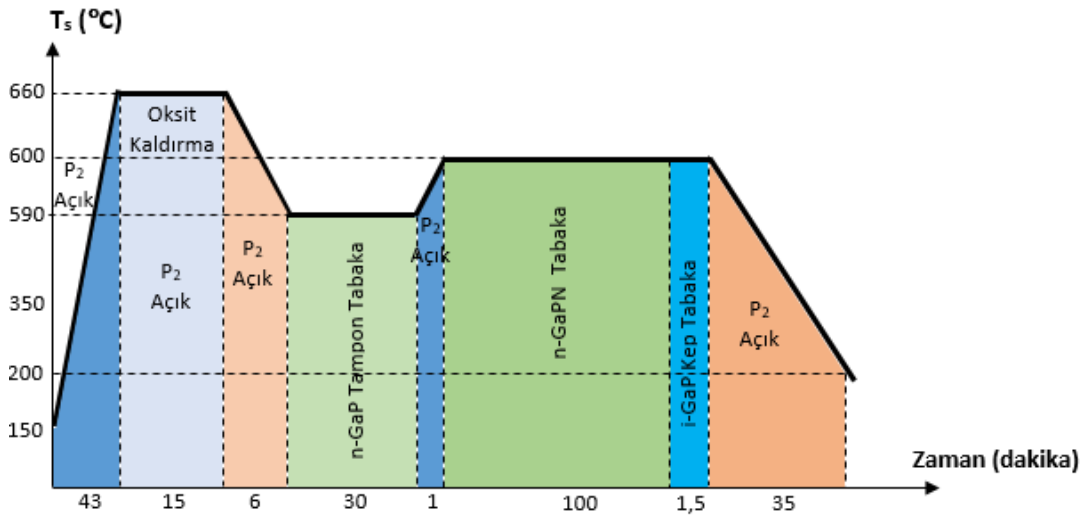


- b) Kimyasal temizlik işlemleri tamamlanan alttaş, bekletilmeden MBE sisteminin yükleme odasına yerleştirildi.
- c) Alttaş, büyütme odasına transfer edilmeden önce hazırlık odasında 350°C’de 1,5 saat ısıtılarak üzerindeki su buharı ve alttaştan buharlaşabilen diğer kirliliklerin temizlenmesi sağlandı.
- d) Alttaş büyütme odasına transfer edilerek manipülatöre yüklendi.
- e) Sıvı azot paneli doldurulduktan sonra sıvı azot akışı büyütme süresinde sabit kalacak şekilde ayarlandı.
- f) Büyütmede kullanılacak kaynak hücreler (Ga, GaP, Si, Be) düşük sıcaklık artışlarıyla (6 °C/dakika) ısıtılmaya başlandı. Hücre sıcaklıkları Çizelge 4.3’de verildi.
- g) Ga akışı, MIG yardımıyla istenilen büyütme oranına ulaşabilmek için kalibre edildi.
- h) Büyütme işlemi için takip edilecek adımlar V80H MBE sisteminde kullanılan Crystal programına yüklendi.
- i) Alttaş üzerinde bulunan oksit tabakasının kaldırılması için alttaş 10% rpm hızında döndürülerek, 600 °C’ye kadar ısıtılmaya başlandı.
- j) Alttaş sıcaklığı 600 °C’ye geldikten sonra RHEED penceresinden desene bakıldığında oksit tabakasının kalkmaya başladığı, desendeki belirginleşmeden anlaşıldı. Alttaş sıcaklığı kontrollü olarak 660 °C’ye çıkartıldı ve oksit tabakasının tamamen kalkması için bu sıcaklıkta 15 dakika beklendi. Bu işlem sonunda RHEED deseninin netleşmesiyle, beklenen kristal yapı düzeni gözlemlendi. Sonuç olarak oksit tabakasının tamamen kaldırıldığı sonucuna varıldı.
- k) Oksit tabakası kaldırıldıktan sonra, alttaş sıcaklığı 590 °C’ye düşürüldü. Bu sıcaklıkta n-GaP tampon tabakası büyütüldü. Bunun için Ga, GaP ve Si kaynak kesicileri açıldı.
- l) Alttaş sıcaklığı 600 °C ‘ye çıkartıldı, yüksek saflıkta N<sub>2</sub> gaz akışı ve N-RF plazma kaynağının gücü ayarlandı. Çizelge 4.3’de verilen parametreler kullanılarak p-GaPN tabakası büyütüldü.
- m) Son olarak katkısız GaP keş tabakası büyütülerek büyütme tamamlandı.

GS295 numunesinin büyütme grafiği Şekil 4.5’de verildi.

Çizelge 4.3. GS295 numunesinin büyütme parametreleri

|             |                                                                            |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------|
| $T_{Altaş}$ | 660 °C (Oksit Kaldırma)<br>600 °C (p-GaPN, i-GaP)<br>590 °C (n-GaP Tampon) |
| $T_{Ga}$    | 830 °C                                                                     |
| $T_{GaP}$   | 1040 °C                                                                    |
| $T_{Be}$    | 875 °C                                                                     |
| $T_{Si}$    | 1150 °C                                                                    |
| $N-plazma$  | 0,4 sccm ( $1,2 \times 10^{-5}$ mbar)<br>P= 280 W                          |



Şekil 4.5. GS295 numunesinin büyütme grafiği

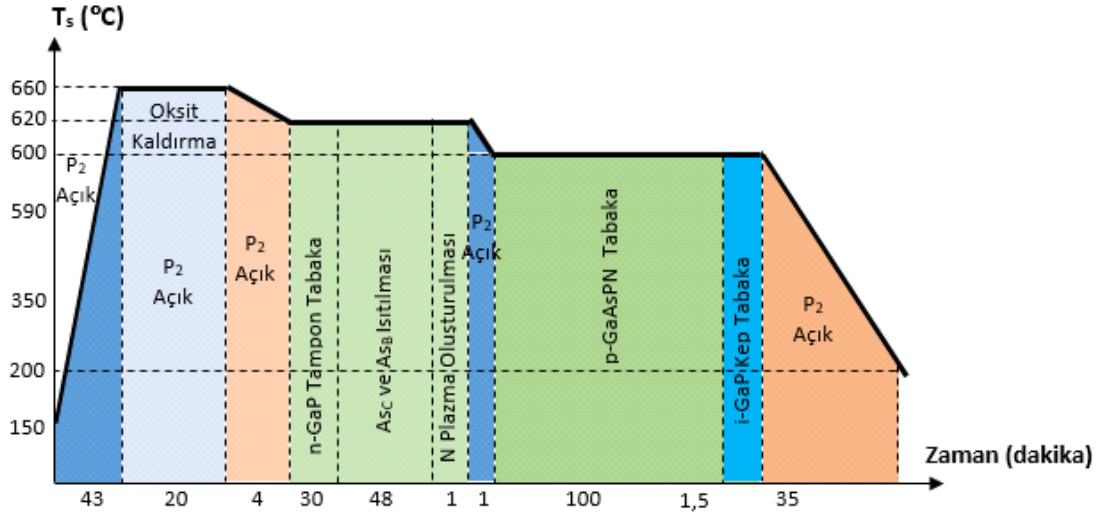
GS298 numunesinin büyütme adımları;

- n-GaP(100) alttaş MBE sistemine yüklenmeden önce, üzerinde bulunabilecek oksit tabakası kimyasal olarak yüzeyden kaldırıldı. Ardından alttaş, aseton, alkol ve DI-H<sub>2</sub>O ile temizlenerek N<sub>2</sub> ile kurutuldu.
- Kimyasal temizlik işlemleri tamamlanan alttaş, bekletilmeden MBE sisteminin yükleme odasına yerleştirildi.
- Alttaş, büyütme odasına transfer edilmeden önce hazırlık odasında 350°C'de 1,5 saat ısıtılarak üzerindeki su buharı ve alttaştan buharlaşabilen diğer kirliliklerin temizlenmesi sağlandı.
- Alttaş büyütme odasına transfer edilerek manipülatöre yüklendi.

- e) Sıvı azot paneli doldurulduktan sonra sıvı azot akışı büyütme süresinde sabit kalacak şekilde ayarlandı.
- f) Büyütmede kullanılacak kaynak hücreler (Ga, GaP, Si, Be, As) düşük sıcaklık artışlarıyla (6 °C/dakika) ısıtılmaya başlandı. Hücre sıcaklıkları Çizelge 4.4’de verildi.
- g) Ga akışı, MIG yardımıyla istenilen büyütme oranına ulaşabilmek için kalibre edildi.
- h) Büyütme işlemi için takip edilecek adımlar V80H MBE sisteminde kullanılan Crystal programına yüklendi.
- i) Alttaş üzerinde bulunan oksit tabakasının kaldırılması için alttaş 10% rpm hızında döndürülerek, 600 °C’ye kadar ısıtılmaya başlandı.
- j) Alttaş sıcaklığı 600 °C’ye geldikten sonra RHEED penceresinden desene bakıldığında oksit tabakasının kalkmaya başladığı, desendeki belirginleşmeden anlaşıldı. Alttaş sıcaklığı kontrollü olarak 660 °C’ye çıkartıldı ve oksit tabakasının tamamen kalkması için bu sıcaklıkta 20 dakika beklendi. Bu işlem sonunda RHEED deseninin netleşmesiyle, beklenen kristal yapı düzeni gözlemlendi. Sonuç olarak oksit tabakasının tamamen kaldırıldığı sonucuna varıldı.
- k) Oksit tabakası kaldırıldıktan sonra, alttaş sıcaklığı 620 °C’ye düşürüldü. Bu sıcaklıkta n-GaP tampon tabakası büyütüldü. Bunun için Ga, GaP ve Si kaynak kesicileri açıldı.
- l) Alttaş sıcaklığı 600 °C ‘ye düşürüldü, yüksek saflıkta N<sub>2</sub> gaz akışı ve N-RF plazma kaynağının gücü ayarlandı. Çizelge 4.4’de verilen parametreler kullanılarak p-GaAsPN tabakası büyütüldü.
- m) Son olarak katkısız GaP kep tabakası büyütülerek büyütme tamamlandı. GS298 numunesinin büyütme grafiği Şekil 4.6’de verildi.

Çizelge 4.4. GS298 numunesinin büyütme parametreleri

|              |                                       |
|--------------|---------------------------------------|
| $T_{Alttaş}$ | 660 °C (Oksit Kaldırma)               |
|              | 620 °C (n-GaP Tampon)                 |
|              | 600 °C (p-GaAsPN, i-GaP)              |
| $T_{Ga}$     | 830 °C                                |
| $T_{GaP}$    | 1040 °C                               |
| $T_{Be}$     | 875 °C                                |
| $T_{Si}$     | 1175 °C                               |
| $T_{As}$     | Bulk 350 °C, Kırma 950 °C             |
| $N-plazma$   | 0,4 sccm ( $1,2 \times 10^{-5}$ mbar) |
|              | P= 280 W                              |



Şekil 4.6. GS298 numunesinin büyütme grafiği

#### 4.1.3. GaP/Si kalibrasyon numunelerinin büyütülmesi

Si alttaş üzerine seyreltik azotlu p-n eklem yapılarının yüksek kristal kalitesinde büyütülebilmesi amacıyla, önceki bölümde verilen, Si alttaş üzerine GaP büyütülmesinde kullanılan yöntemler denendi. GaP/Si kalibrasyon numuneleri GS300 ve GS301 olarak isimlendirildi (Şekil 4.7). GS300 numunesinde, Si alttaş üzerine P<sub>2</sub> akısı gönderildi ardından GaP büyütüldü ve sıcaklık adım artımlı olarak arttırılıp tavlama yapıldı. GS301 numunesinde ise Si alttaş üzerine MEE yöntemi ile ince katman GaP büyütüldü, ardından GaP tabakası büyütüldü ve sıcaklık adım artımlı olarak arttırılıp tavlama yapıldı. GS300 ve GS301 GaP/Si kalibrasyon numunelerinin büyütme şartları, sıralı adımlar halinde aşağıda verildi.

|                                     |                     |
|-------------------------------------|---------------------|
| i-GaP ~ 60nm                        | i-GaP ~ 60 nm       |
| P <sub>2</sub> Katkılama (3 dakika) | i-GaP MEE 5x        |
| n-Si (100)-(110) 4°                 | n-Si (100)-(110) 4° |
| <b>GS 300</b>                       | <b>GS 301</b>       |

Şekil 4.7. GS300 ve GS301 GaP/Si kalibrasyon numunelerinin büyütme şekilleri

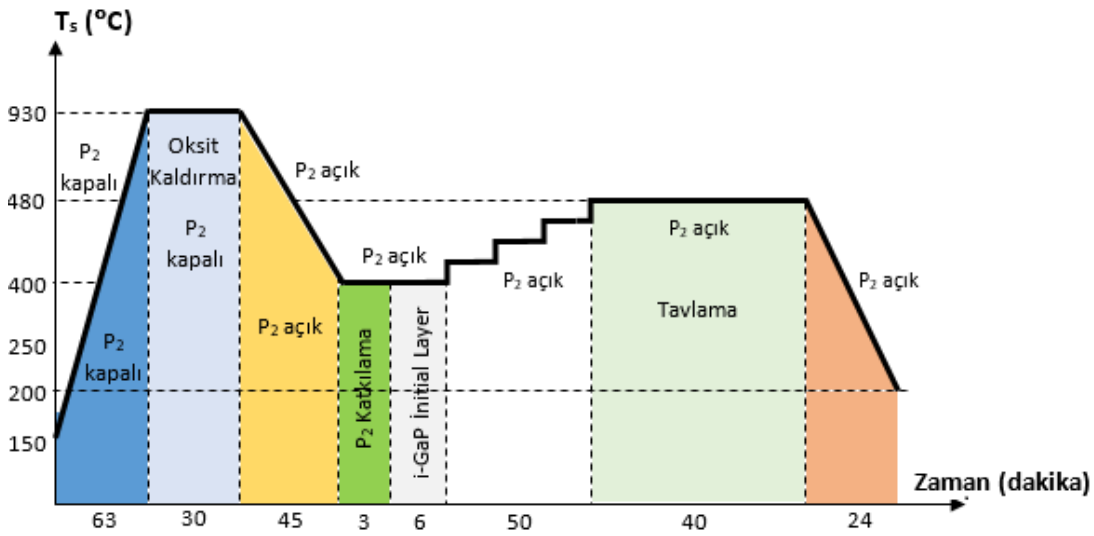
GS300 numunesinin büyütme adımları;

- a) n-Si(100)-(110) 4° alttaş MBE sistemine yüklenmeden önce, üzerinde bulunabilecek oksit tabakası kimyasal olarak yüzeyden kaldırıldı. Ardından alttaş, aseton, alkol ve DI-H<sub>2</sub>O ile temizlenerek N<sub>2</sub> ile kurutuldu.
- b) Kimyasal temizlik işlemleri tamamlanan alttaş, bekletilmeden MBE sisteminin yükleme odasına yerleştirildi.
- c) Alttaş, büyütme odasına transfer edilmeden önce hazırlık odasında 400 °C’de 1,5 saat ısıtılarak üzerindeki su buharı ve alttaştan buharlaşabilen diğer kirliliklerin temizlenmesi sağlandı.
- d) Alttaş büyütme odasına transfer edilerek manipülatöre yüklendi.
- e) Sıvı azot paneli doldurulduktan sonra sıvı azot akışı büyütme süresinde sabit kalacak şekilde ayarlandı.
- f) Büyütmede kullanılacak kaynak hücreler (Ga, GaP) düşük sıcaklık artışlarıyla (6 °C/dakika) ısıtılmaya başlandı. Hücre sıcaklıkları Çizelge 4.5’de verildi.
- g) Ga akısı, MIG yardımıyla istenilen büyütme oranına ulaşabilmek için kalibre edildi.
- h) Büyütme işlemi için takip edilecek adımlar V80H MBE sisteminde kullanılan Crystal programına yüklendi.
- i) Alttaş üzerinde bulunan oksit tabakasının kaldırılması için alttaş 10% rpm hızında döndürülerek, 850 °C’ye kadar ısıtılmaya başlandı.
- j) Alttaş sıcaklığı 850 °C’ye geldikten sonra RHEED penceresinden desene bakıldığında oksit tabakasının kalkmaya başladığı, desendeki belirginleşmeden anlaşıldı. Alttaş sıcaklığı kontrollü olarak 930 °C’ye çıkartıldı ve oksit tabakasının tamamen kalkması için bu sıcaklıkta 30 dakika beklendi. Bu işlem sonunda RHEED deseninin netleşmesiyle, beklenen kristal yapı düzeni gözlemlendi. Sonuç olarak oksit tabakasının tamamen kaldırıldığı sonucuna varıldı.
- i) Oksit tabakası kaldırıldıktan sonra, alttaş sıcaklığı 400 °C’ye düşürüldü. P<sub>2</sub> akısı 3 dakika boyunca alttaş yüzeyine gönderildi. Bunun için GaP hücresinin kaynak kesicisi 3 dakika açıldı.
- j) Ga ve GaP kaynak kesicileri açılarak alttaş yüzeyinde GaP tabakası oluşturuldu.
- k) Alttaş sıcaklığı, adım artımlı olarak (1,6 °C/dakika) 480 °C ‘ye çıkartıldı. Bu sıcaklıkta 40 dakika boyunca tavlandı.

GS300 numunesinin büyütme grafiği Şekil 4.8’de verildi.

Çizelge 4.5. GS300 numunesinin büyütme parametreleri

|             |                                                               |
|-------------|---------------------------------------------------------------|
| $T_{Altaş}$ | 930 °C (Oksit Kaldırma)<br>480 °C (Tavlama)<br>400 °C (i-GaP) |
| $T_{Ga}$    | 830 °C                                                        |
| $T_{GaP}$   | 1040 °C                                                       |



Şekil 4.8. GS300 numunesinin büyütme grafiği

GS301 numunesinin büyütme adımları;

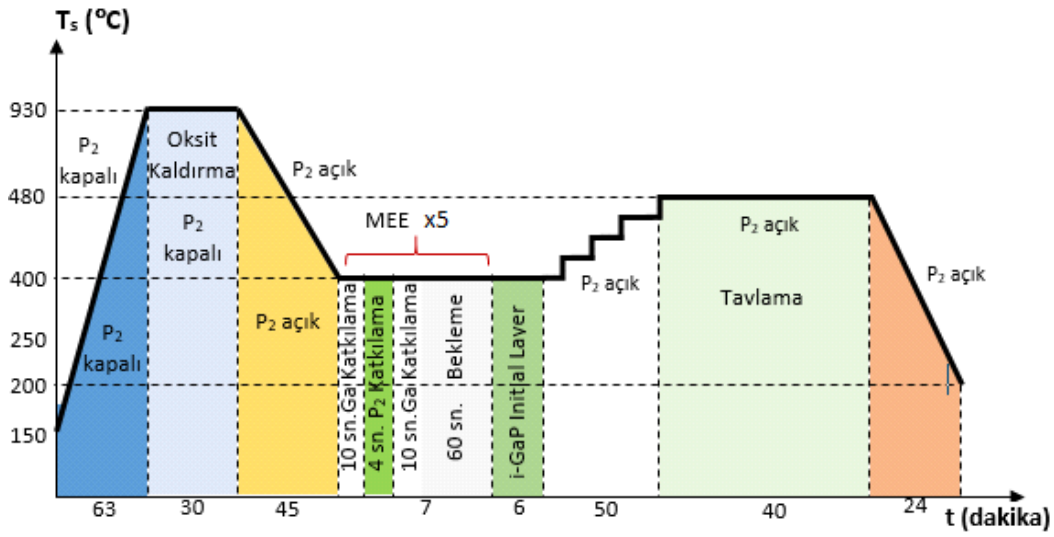
- n-Si(100)-(110) 4° alttaş MBE sistemine yüklenmeden önce, üzerinde bulunabilecek oksit tabakası kimyasal olarak yüzeyden kaldırıldı. Ardından alttaş, aseton, alkol ve DI-H<sub>2</sub>O ile temizlenerek N<sub>2</sub> ile kurutuldu.
- Kimyasal temizlik işlemleri tamamlanan alttaş, bekletilmeden MBE sisteminin yükleme odasına yerleştirildi.
- Alttaş, büyütme odasına transfer edilmeden önce hazırlık odasında 400 °C'de 1,5 saat ısıtılarak üzerindeki su buharı ve alttaştan buharlaşabilen diğer kirliliklerin temizlenmesi sağlandı.
- Alttaş büyütme odasına transfer edilerek manipülatöre yüklendi.
- Sıvı azot paneli doldurulduktan sonra sıvı azot akışı büyütme süresinde sabit kalacak şekilde ayarlandı.
- Büyütmede kullanılacak kaynak hücreler (Ga, GaP) düşük sıcaklık artışlarıyla (6 °C/dakika) ısıtılmaya başlandı. Hücre sıcaklıkları Çizelge 4.6'de verildi.

- g) Ga akısı, MIG yardımıyla istenilen büyütme oranına ulaşabilmek için kalibre edildi.
- h) Büyütme işlemi için takip edilecek adımlar V80H MBE sisteminde kullanılan Crystal programına yüklendi.
- i) Alttaş üzerinde bulunan oksit tabakasının kaldırılması için alttaş 10% rpm hızında döndürülerek, 850 °C'ye kadar ısıtılmaya başlandı.
- j) Alttaş sıcaklığı 850 °C'ye geldikten sonra RHEED penceresinden desene bakıldığında oksit tabakasının kalkmaya başladığı gözlemlendi. Alttaş sıcaklığı kontrollü olarak 930 °C'ye çıkartıldı ve oksit tabakasının tamamen kalkması için bu sıcaklıkta 30 dakika bekletildi. Bu işlem sonunda RHEED deseninin netleşmesiyle, beklenen kristal yapı düzeni gözlemlendi. Sonuç olarak oksit tabakasının tamamen kaldırıldığı sonucuna varıldı.
- i) Oksit tabakası kaldırıldıktan sonra, alttaş sıcaklığı 400 °C'ye düşürüldü. MEE yöntemi kullanılarak yüzeye ardışık olarak Ga ve P atomları gönderildi. Bu işlem Ga ve GaP kaynak kesicilerinin ardışık hareketleri ile 5 kez tekrarlandı.
- j) Ga ve GaP kaynak kesicileri açılarak alttaş yüzeyinde GaP tabakası oluşturuldu.
- k) Alttaş sıcaklığı, adım artımlı olarak (1,6 °C/dakika) 480 °C 'ye çıkartıldı. Bu sıcaklıkta 40 dakika boyunca tavlandı.

GS301 numunesinin büyütme grafiği Şekil 4.9'de verildi.

Çizelge 4.6. GS301 numunesinin büyütme parametreleri

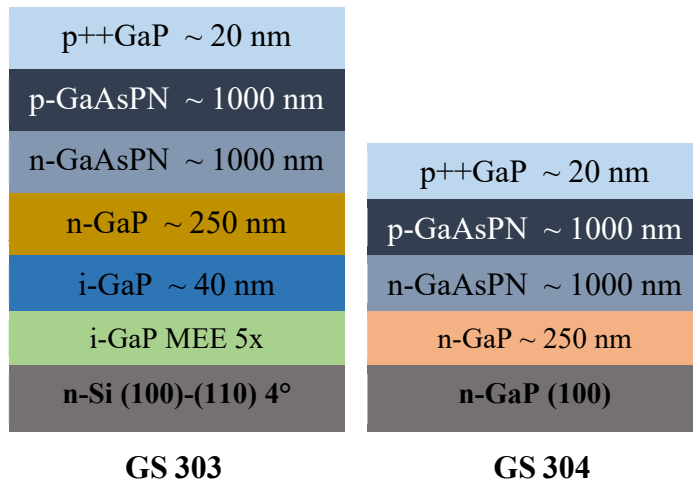
|              |                         |
|--------------|-------------------------|
| $T_{Alttas}$ | 930 °C (Oksit Kaldırma) |
|              | 480 °C (Tavlama)        |
|              | 400 °C (i-GaP, GaP MEE) |
| $T_{Ga}$     | 830 °C                  |
| $T_{GaP}$    | 1040 °C                 |



Şekil 4.9. GS301 numunesinin büyütme grafiği

#### 4.1.4. p-n eklem GaAsPN yapısının Si ve GaP alttaşlar üzerine büyütülmesi

Bu çalışma kapsamında son olarak, Si ve GaP alttaşlar üzerine seyreltik azotlu GaAsPN p-n eklem yapıları büyütüldü. Numuneler, GS303 ve GS304 olarak isimlendirildi. Numunelerin büyütme şekilleri Şekil 4.10'da verildi. Si alttaş üzerine büyütme yapılan GS303 numunesinde, GaP/Si kalibrasyon numunelerinin sonuçlarından yararlanılarak MEE ve tavlama işlemleri uygulandı.



Şekil 4.10. GS303 ve GS304 numunelerinin büyütme şekilleri

GS303 ve GS304 p-n eklem numunelerinin büyütme şartları, sıralı adımlar halinde aşağıda verildi.

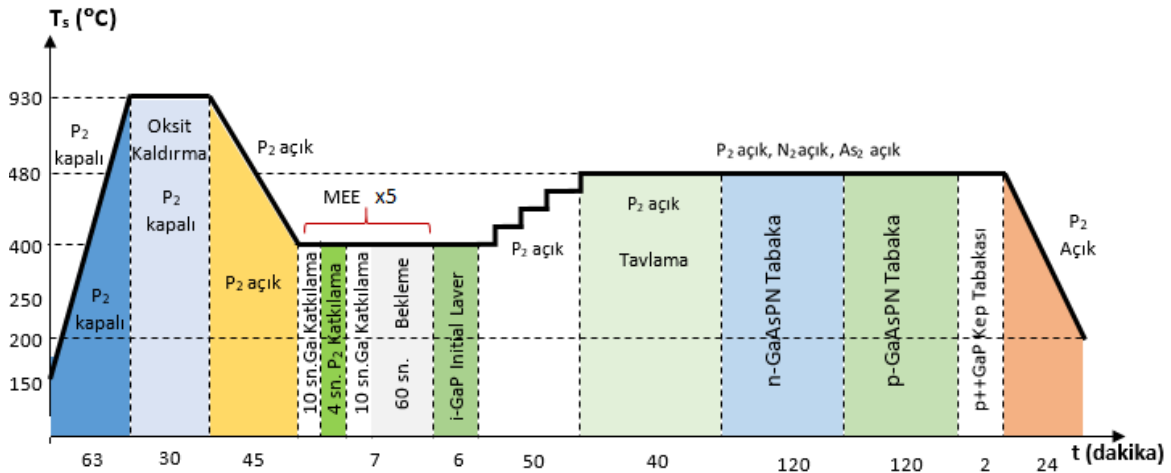
GS303 numunesinin büyütme adımları;

- a) n-Si(100)-(110) 4° MBE sistemine yüklenmeden önce, üzerinde bulunabilecek oksit tabakası kimyasal olarak yüzeyden kaldırıldı. Ardından alttaşı, aseton, alkol ve DI-H<sub>2</sub>O ile temizlenerek N<sub>2</sub> ile kurutuldu.
- b) Kimyasal temizlik işlemleri tamamlanan alttaşı, bekletilmeden MBE sisteminin yükleme odasına yerleştirildi.
- c) Alttaşı, büyütme odasına transfer edilmeden önce hazırlık odasında 400 °C’de 1,5 saat ısıtılarak üzerindeki su buharı ve alttaştan buharlaşabilen diğer kirliliklerin temizlenmesi sağlandı.
- d) Alttaşı büyütme odasına transfer edilerek manipülatöre yüklendi.
- e) Sıvı azot paneli doldurulduktan sonra sıvı azot akışı büyütme süresinde sabit kalacak şekilde ayarlandı.
- f) Büyütmede kullanılacak kaynak hücreler (Ga, GaP, As, Si, Be) düşük sıcaklık artışlarıyla (6 °C/dakika) ısıtılmaya başlandı. Hücre sıcaklıkları Çizelge 4.7’de verildi.
- g) Ga akışı, MIG yardımıyla istenilen büyütme oranına ulaşabilmek için kalibre edildi.
- h) Büyütme işlemi için takip edilecek adımlar V80H MBE sisteminde kullanılan Crystal programına yüklendi.
- i) Alttaşı üzerinde bulunan oksit tabakasının kaldırılması için alttaşı 10% rpm hızında döndürülerek, 850 °C’ye kadar ısıtılmaya başlandı.
- j) Alttaşı sıcaklığı 850 °C’ye geldikten sonra RHEED penceresinden desene bakıldığında oksit tabakasının kalkmaya başladığı gözlemlendi. Alttaşı sıcaklığı kontrollü olarak 930 °C’ye çıkartıldı ve oksit tabakasının tamamen kalkması için bu sıcaklıkta 30 dakika bekletildi. Bu işlem sonunda RHEED deseninin netleşmesiyle, beklenen kristal yapı düzeni gözlemlendi. Sonuç olarak oksit tabakasının tamamen kaldırıldığı sonucuna varıldı.
- i) Oksit tabakası kaldırıldıktan sonra, alttaşı sıcaklığı 400 °C’ye düşürüldü. MEE yöntemi kullanılarak yüzeye ardışık olarak Ga ve P atomları gönderildi. Bu işlem Ga ve GaP kaynak kesicilerinin ardışık hareketleri ile 5 kez tekrarlandı.
- j) Ga ve GaP kaynak kesicileri açılarak alttaşı yüzeyinde GaP tabakası oluşturuldu.
- k) Alttaşı sıcaklığı, adım artımlı olarak (1,6 °C/dakika) 480 °C ‘ye çıkartıldı. Bu sıcaklıkta 40 dakika boyunca tavlandı.
- l) Alttaşı sıcaklığı 630 °C’ye çıkartıldı, yüksek saflıkta N<sub>2</sub> gaz akışı ve N-RF plazma kaynağının gücü ayarlandı Çizelge 4.7’deki parametreler kullanılarak p-n GaAsPN tabakaları büyütüldü.

m) Son olarak p++GaP keş tabakası büyütülerek büyütme tamamlandı. GS303 numunesinin büyütme grafiği Şekil 4.11’de verildi.

Çizelge 4.7. GS303 numunesinin büyütme parametreleri

|             |                                                                                                        |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $T_{Altaş}$ | 930 °C (Oksit Kaldırma)<br>630 °C (p-GaAsPN, n- GaAsPN)<br>480 °C (Tavlama)<br>400 °C (GaP MEE, i-GaP) |
| $T_{Ga}$    | 821 °C                                                                                                 |
| $T_{GaP}$   | 1040 °C                                                                                                |
| $T_{Be}$    | 875 °C (p++GaP)<br>850 °C (p-GaAsPN)                                                                   |
| $T_{Si}$    | 1150 °C                                                                                                |
| $T_{As}$    | Bulk 335 °C, Kırma 690 °C                                                                              |
| $N-plazma$  | 0,4 sccm ( $1,2 \times 10^{-5}$ mbar)<br>P= 280 W                                                      |



Şekil 4.11. GS303 numunesinin büyütme grafiği

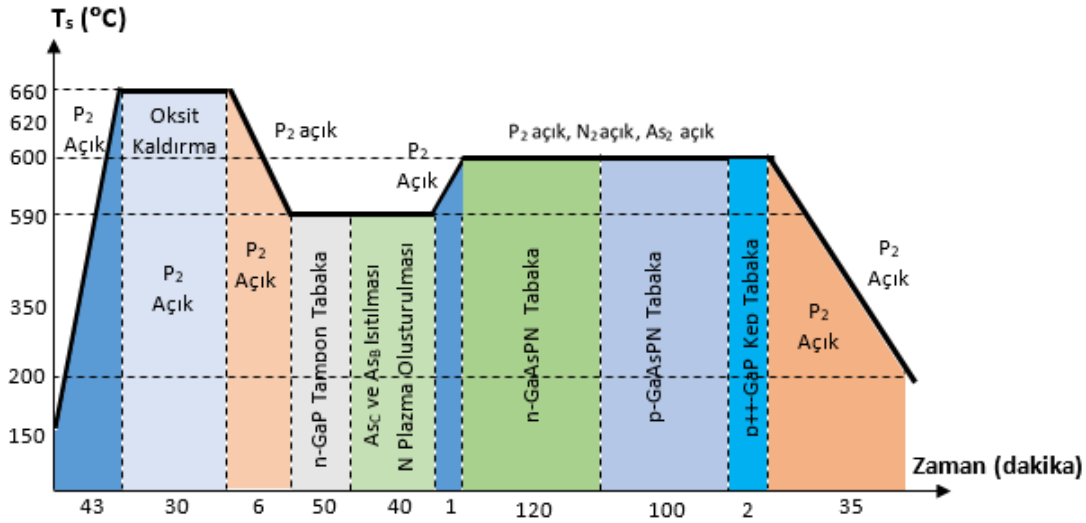
GS304 numunesinin büyütme adımları;

- n-GaP (100) alttaş MBE sistemine yüklenmeden önce, üzerinde bulunabilecek oksit tabakası kimyasal olarak yüzeyden kaldırıldı. Ardından alttaş, aseton, alkol ve DI-H<sub>2</sub>O ile temizlenerek N<sub>2</sub> ile kurutuldu.
- Kimyasal temizlik işlemleri tamamlanan alttaş, bekletilmeden MBE sisteminin yükleme odasına yerleştirildi.

- c) alttaş, büyütme odasına transfer edilmeden önce hazırlık odasında 350 °C’de 1,5 saat ısıtılarak üzerindeki su buharı ve alttaştan buharlaşabilen diğer kirliliklerin temizlenmesi sağlandı.
- d) Alttaş büyütme odasına transfer edilerek manipülatöre yüklendi.
- e) Sıvı azot paneli doldurulduktan sonra sıvı azot akışı büyütme süresinde sabit kalacak şekilde ayarlandı.
- f) Büyütmede kullanılacak kaynak hücreler (Ga, GaP, As, Si, Be) düşük sıcaklık artışlarıyla (6 °C/dakika) ısıtılmaya başlandı. Hücre sıcaklıkları Çizelge 4.8’de verildi.
- g) Ga akışı, MIG yardımıyla istenilen büyütme oranına ulaşabilmek için kalibre edildi.
- h) Büyütme işlemi için takip edilecek adımlar V80H MBE sisteminde kullanılan Crystal programına yüklendi.
- i) Alttaş üzerinde bulunan oksit tabakasının kaldırılması için alttaş 10% rpm hızında döndürülerek, 600 °C’ye kadar ısıtılmaya başlandı.
- j) Alttaş sıcaklığı 600 °C’ye geldikten sonra RHEED penceresinden desene bakıldığında oksit tabakasının kalkmaya başladığı gözlemlendi. Alttaş sıcaklığı kontrollü olarak 660 °C’ye çıkartıldı ve oksit tabakasının tamamen kalkması için bu sıcaklıkta 30 dakika beklendi. Bu işlem sonunda RHEED deseninin netleşmesiyle, beklenen kristal yapı düzeni gözlemlendi. Sonuç olarak oksit tabakasının tamamen kaldırıldığı sonucuna varıldı.
- i) Oksit tabakası kaldırıldıktan sonra, alttaş sıcaklığı 590 °C’ye düşürüldü. . Bu sıcaklıkta n-GaP tampon tabakası büyütüldü. Bunun için Ga, GaP ve Si kaynak kesicileri açıldı.
- j) Alttaş sıcaklığı 600 °C’ye çıkartıldı, yüksek saflıkta N<sub>2</sub> gaz akışı ve N-RF plazma kaynağının gücü ayarlandı. Çizelge 4.8’deki parametreler kullanılarak p-n GaAsPN tabakaları büyütüldü. GS304 numunesinin büyütme grafiği Şekil 4.12’de verildi.

Çizelge 4.8. GS304 numunesinin büyütme parametreleri

|              |                                                                                  |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| $T_{Alttaş}$ | 660 °C (Oksit Kaldırma)<br>600 °C (p-GaAsPN, n- GaAsPN)<br>590 °C (n-GaP Tampon) |
| $T_{Ga}$     | 820 °C                                                                           |
| $T_{GaP}$    | 1040 °C                                                                          |
| $T_{Be}$     | 875 °C (p++GaP)<br>850 °C (p-GaAsPN)                                             |
| $T_{Si}$     | 1150 °C (n-GaAsPN)<br>1175 °C (n-GaP Tampon)                                     |
| $T_{As}$     | Bulk 340 °C, Kırma 730 °C                                                        |
| $N_{plazma}$ | 0,4 sccm ( $1,2 \times 10^{-5}$ mbar)<br>P= 280 W                                |



Şekil 4.12. GS304 numunesinin büyütme grafiği

## 4.2. Yapıların Karakterizasyonları

Numunelerin yapısal, elektriksel ve optik özellikleri, yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı, Hall etkisi ve fotoluminesans ölçümleri değerlendirilerek belirlendi.

### 4.2.1. Hall etkisi analizleri

GS289 ve GS293 olarak adlandırılan katkı kalibrasyon numunelerinin elektriksel özelliklerinin belirlenmesi için oda sıcaklığında ve 0,4 Tesla sabit manyetik alan altında van der Pauw tekniği kullanılarak öz direnç ve Hall etkisi ölçümleri yapıldı. Numunelerin gerekli elektriksel parametreleri belirlendi. Büyütülen numunelerin oda sıcaklığında öz direnç ve taşıyıcı yoğunluğu değerleri Çizelge 4.9'da verildi.

Çizelge 4.9. Numunelerin Hall etkisi ölçüm sonuçları

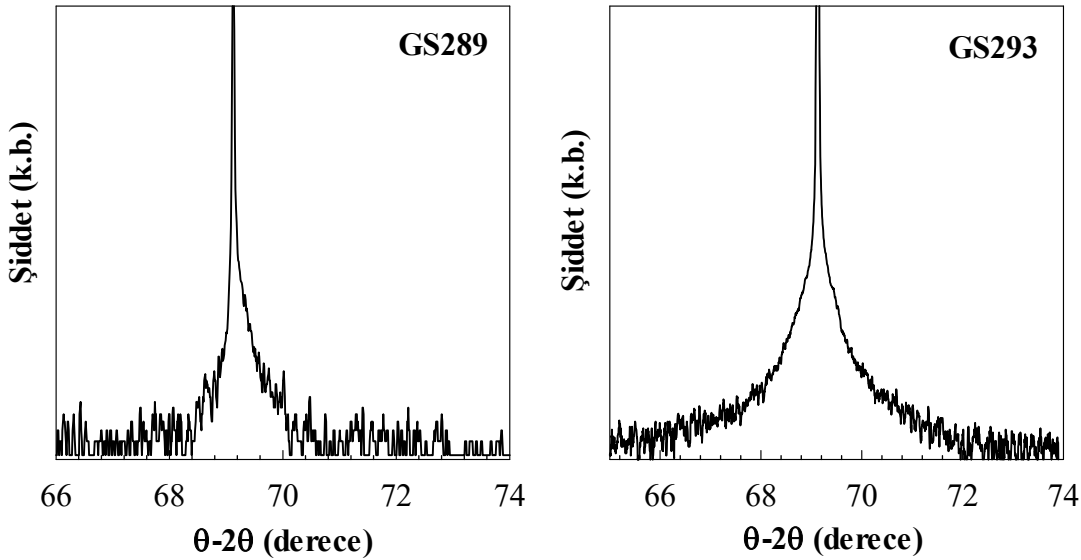
| Numune | Öz direnç<br>(ohm. cm)  | Hall Katsayısı<br>(cm <sup>3</sup> /C) | Taşıyıcı Yoğunluğu<br>(cm <sup>-3</sup> ) |
|--------|-------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------|
| GS289  | $4,4708 \times 10^{-4}$ | -9,8959                                | $6,3078 \times 10^{17}$                   |
| GS293  | $1,6863 \times 10^{-3}$ | +3,7121                                | $1,6816 \times 10^{18}$                   |

Hall etkisi ölçüm sonuçlarında Hall katsayısının pozitif olması, numunenin p-tipi, negatif olması ise n-tipi olduğunu göstermektedir. Buna göre Çizelge 4.9 incelendiğinde,

hedeflendiği gibi GS289 numunesinin n-tipi, GS293 numunesinin ise p-tipi olduğu görülmektedir. Numunelerin taşıyıcı yoğunlukları, sırasıyla  $6,3078 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  ve  $1,6816 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  olarak belirlendi. Bu değerlerin, devam edecek çalışmalarda üretilecek olan p-n eklem yapılar için uygun olduğu düşünülmektedir.

#### 4.2.2. Yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı (HRXRD) analizleri

GS289 ve GS293 katkı kalibrasyon numunelerinin HRXRD  $\theta$ - $2\theta$  kırınım desenleri, Şekil 4.13'de verildi. Her iki numunede de  $69,12^\circ$ 'de gözlenen şiddetli pik, Si alttaştan kaynaklanan Si (400) kırınım pikine karşılık gelmektedir [41]. GS289 numunesinde görünen ve Si alttaş pikinin sağında yer alan omuzun, literatürde GaPN/Si büyütmelemlerine ait kırınım desenine [34] benzerliği nedeniyle, GaPN tabakasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak Şekil 4.13'de görüldüğü gibi bu omuz, simüle edilebilecek kadar belirgin değildir. GS293 numunesinde ise omuzlanma gözlenemedi. Bu durum, GaPN tabakasına ait pikin sahip olduğu azot oranı sebebiyle Si alttaş piki ile üst üste gelmiş olabileceğine atfedilebilir. Piklerin belirgin olarak görülememesi, Si üzerine GaP ve GaPN büyütülmesinde oluşan AFB'ler ve azot kaynaklı yapısal kusurların varlığının bir göstergesi olabilir.

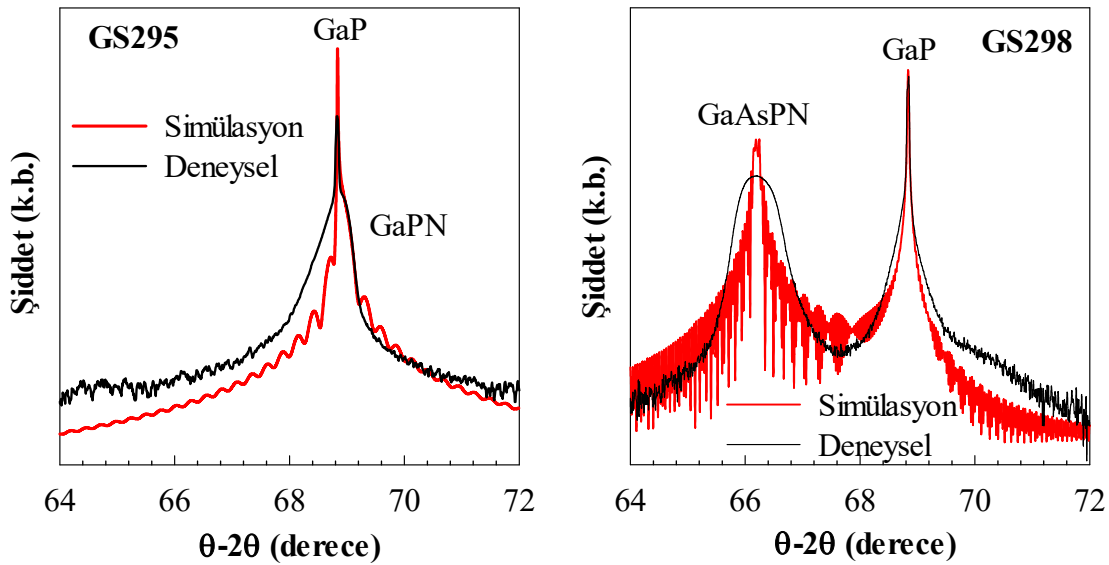


Şekil 4.13. GS289 ve GS293 numunelerinin HRXRD kırınım desenleri

GS295 ve GS298 seyreltik azotlu p-n eklem numunelerinin HRXRD  $\theta$ - $2\theta$  kırınım desenleri, Şekil 4.14'de verildi. GS295 numunesinde  $68,89^\circ$ 'de gözlenen şiddetli pik, GaP alttaştan kaynaklanan GaP (400) kırınımına aittir [41]. GaP pikinin sağında oluşan omuzun, literatürle

uyumlu olarak, GaPN tabakasına ait olduğu düşünülmektedir [47]. GS298 numunesinde 68,88°'de gözlenen en şiddetli pik yine GaP alttaşın (400) kırınım pikidir. GaP pikinin solunda oluşan 66,19°'deki kırınım pikinin ise literatürle uyumlu olarak GaAsPN tabakasına ait olduğu düşünülmektedir [46]. GaAsPN tabakalarına ait kırınım pikinin pik yarı-genişliği 0,59°'dir. Bu yüksek değerin, bu tabakadaki kristal kusurlarından kaynaklandığı söylenebilir.

Numunelerdeki P, As ve N kompozisyon değerleri, HRXRD ölçüm sonuçlarının LEPTOS programı kullanılarak simüle edilmesiyle elde edilebilir. Şekil 4.14'de görüldüğü gibi numunelere simülasyon uygulandı ve elde edilen alaşım oranları Çizelge 4.10'da verildi. Sırasıyla %0,33 ve %0,8 azot oranına sahip seyreltik azotlu GaPN ve GaAsPN yapılarının hedeflendiği gibi düşük azot oranına sahip olacak şekilde büyütüldüğü görüldü.



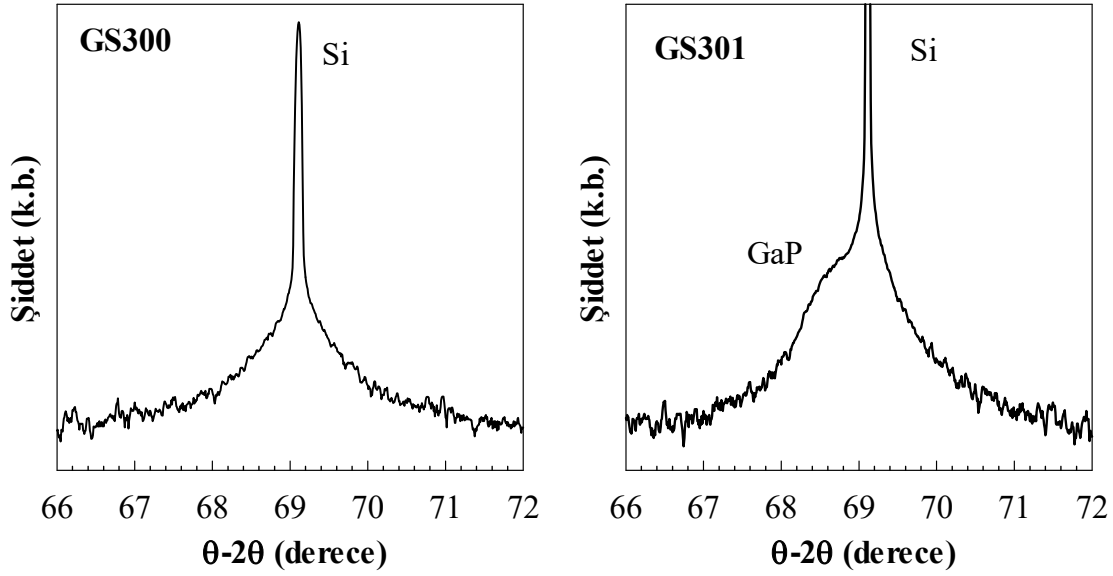
Şekil 4.14. GS295 ve GS298 numunelerinin HRXRD kırınım desenleri

Çizelge 4.10. GS295 ve GS298 numunelerinin alaşım oranları

| Numune | N oranı (x) | P oranı | As oranı (y) |
|--------|-------------|---------|--------------|
| GS295  | % 0,33      | % 99,67 | -            |
| GS298  | % 0,80      | % 45,20 | % 54,00      |

Si alttaş üzerinde büyütülen GaP tabakasının kristal kalitesini arttırmak için iki farklı yöntemle büyütülen GS300 ve GS301 GaP/Si kalibrasyon numunelerinin HRXRD  $\theta$ -2 $\theta$

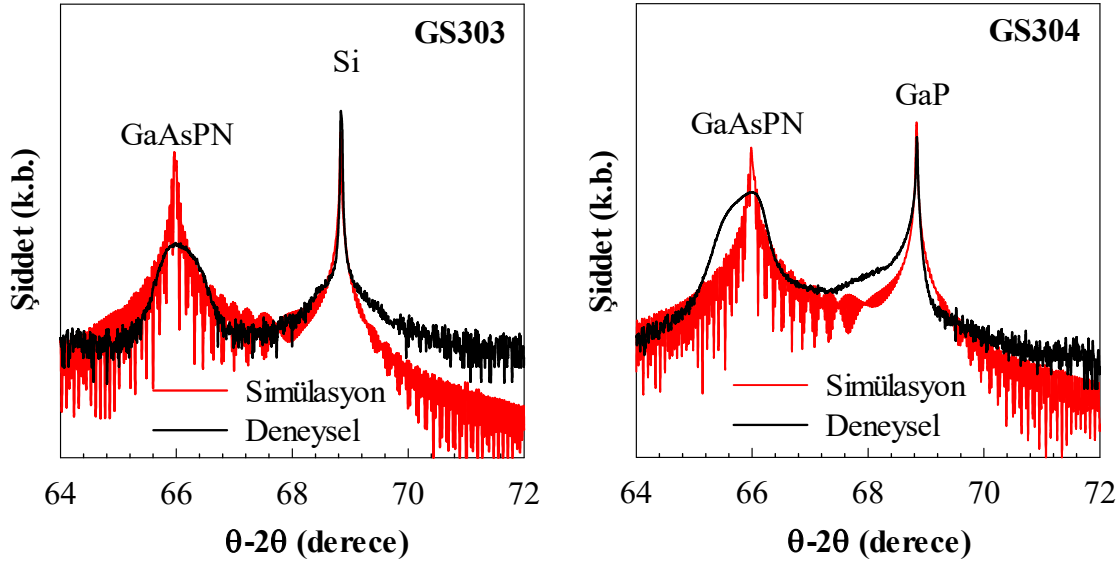
kırınım desenleri, Şekil 4.15’de verildi. Her iki numunede de  $69,11^\circ$ ’de gözlenen şiddetli pik, Si alttaşın (400) kırınım pikine karşılık gelmektedir [41]. GS301 numunesinde Si kırınım pikinin solunda oluşan omuzun, GaP/Si yapılarının literatürde yer alan kırınım desenleriyle uyumlu olarak GaP tabakasına ait olduğu görülmektedir [45]. GS300 numunesinin kırınım deseninde ise GaP tabakasına ait pik gözlenemedi. Bunun nedeni olarak, Si alttaş üzerine büyütülen GaP tabakasının, AFB ve diğer yapısal kusurlar nedeniyle düzgün biçimde kristalleşemediği düşünülebilir.



Şekil 4.15. GS300 ve GS301 numunelerinin HRXRD kırınım desenleri

Si alttaş üzerine büyütülen GS303 ve GaP alttaş üzerine büyütülen GS304 seyreltik azotlu GaAsPN p-n eklem numunelerin HRXRD  $\theta$ - $2\theta$  kırınım desenleri, Şekil 4.16’da verildi. GS303 numunesinde  $69,11^\circ$ ’de görülen en şiddetli kırınım piki, Si alttaşın kaynaklanan Si (400) kırınım pikine karşılık gelmektedir [41]. Literatür ile uyumlu olarak, Si pikinin solundaki omuzun GaP tampon tabakasına, en solda yer alan  $66,01^\circ$ ’deki pikin ise GaAsPN tabakasına ait kırınım pikleri olduğu söylenebilir [45]. GS304 numunesinde  $68,89^\circ$ ’deki en şiddetli pik, GaP alttaşın (400) kırınım pikine karşılık gelmektedir. GaP pikinin solunda oluşan  $65,99^\circ$ ’deki pikin ise GaAsPN tabakasına ait kırınım pikine karşılık geldiği ifade edilebilir. GaAsPN tabakalarına ait kırınım piklerinin pik yarı-genişliği sırasıyla  $0,59^\circ$  ve  $0,52^\circ$ ’dir. Bu yüksek değerlerin bu tabakadaki kristal kusurlarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Numunelerdeki P, As ve N kompozisyon değerleri (x, y), HRXRD ölçüm sonuçlarının simüle edilmesiyle elde edilebilir. Kırınım desenlerine, LEPTOS programı kullanılarak simülasyon uygulanması ile elde edilen alaşım oranları, Çizelge 4.11’de verildi. Çizelge 4.11’de görüldüğü gibi, benzer büyütme şartlarına sahip GS303 ve GS304 numunelerinin kompozisyon değerleri birbirine oldukça yakındır.



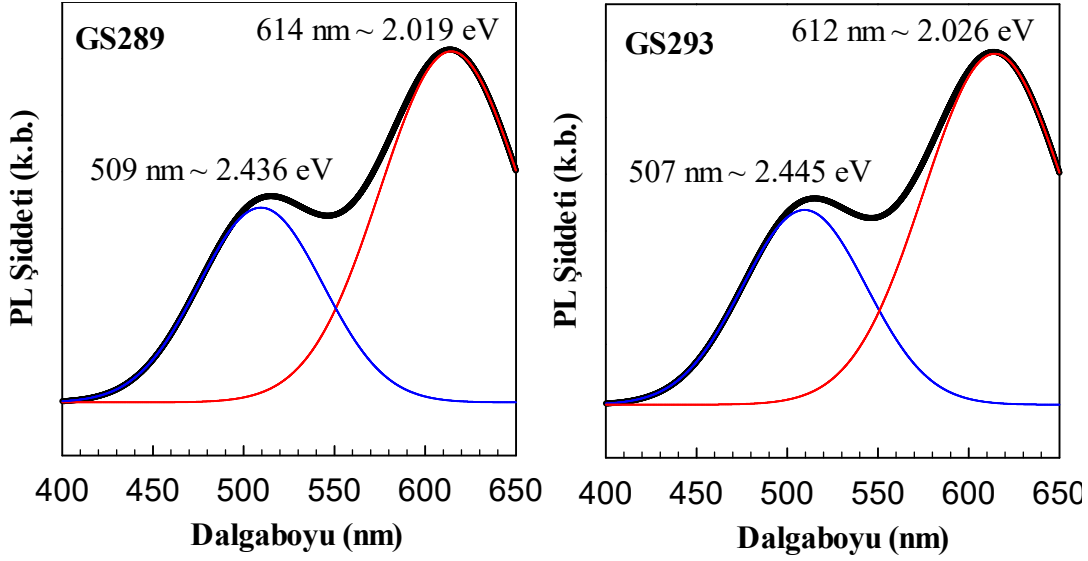
Şekil 4.16. GS303 ve GS304 numunelerinin HRXRD kırınım desenleri

Çizelge 4.11. GS303 ve GS304 numunelerinin alaşım oranları

| Numune | N oranı (x) | P oranı | As oranı (y) |
|--------|-------------|---------|--------------|
| GS303  | % 0,44      | % 43,08 | % 56,48      |
| GS304  | % 0,40      | % 43,60 | % 56,00      |

#### 4.2.3. Fotolüminesans (PL) ölçümlerinin analizi

GS289 ve GS293 katkı kalibrasyon numunelerinin gaussian fit uygulanmış PL spektrumları Şekil 4.17’de verildi. İki numunenin de PL spektrumu incelendiğinde, 509 nm (2,436 eV) ve 507 nm (2,445 eV)’de oluşan piklerin, GaPN’a ait lüminesans piki olduğu ve E<sub>+</sub> seviyesinden valans bandına geçişe karşılık geldiği düşünülmektedir. Numunelerde 614 nm (2,019 eV) ve 612 nm (2,026 eV)’de görülen piklerin ise GaPN’ın E<sub>-</sub> seviyesinden valans bandına geçişe karşılık geldiği ve GaPN’ın yasak enerji aralığını verdiği söylenebilir. Beklendiği gibi literatürle uyumlu olarak yapıya giren azotun, GaP’in bant aralığını azalttığı görüldü [48].

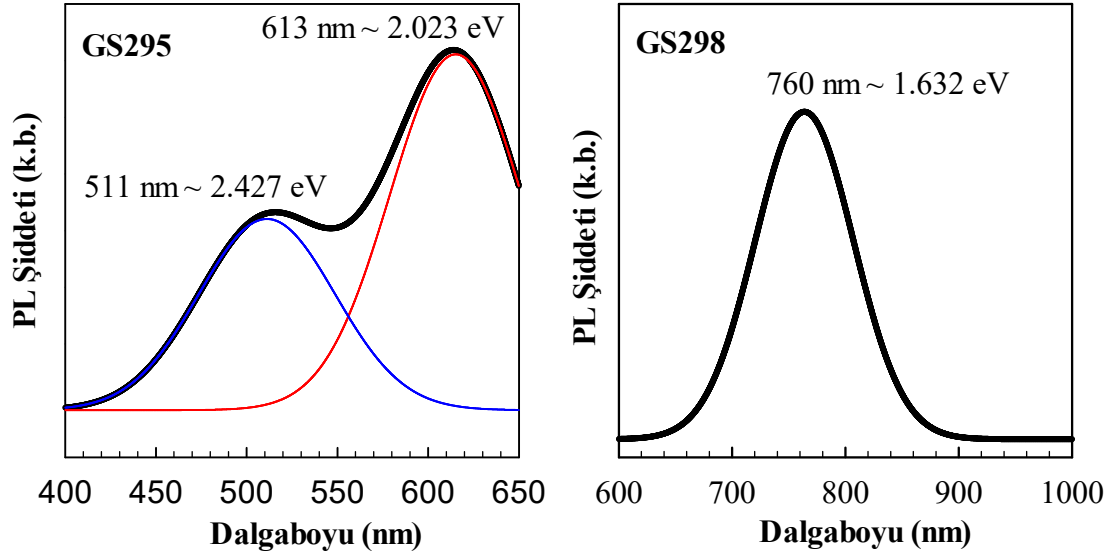


Şekil 4.17. GS289 ve GS293 numunelerinin PL spektrumları

GaP alttaş üzerine büyütülen GS295 ve GS298 numunelerinin gaussian fit uygulanmış PL spektrumları Şekil 4.18’de verildi. GS295 numunesinin PL spektrumu incelendiğinde, 511 nm (2,427 eV)’de oluşan pikin GaPN lüminesans piki olduğu ve  $E_+$  seviyesinden valans bandına geçişe karşılık geldiği düşünülmektedir. Aynı numunede 613 nm (2,023 eV)’de görülen pikin ise  $E_-$  seviyesinden valans bandına geçişe karşılık geldiği ve GaPN’in yasak enerji aralığını verdiği söylenebilir. GS295 numunesinde, literatürle uyumlu olarak yapıya giren azotun GaP’in bant aralığını azalttığı görüldü [31].

GS298 numunesinin PL spektrumu incelendiğinde, 760 nm (1.632 eV)’de gözlenen pikin GaAsPN lüminesans piki olduğu düşünülmektedir. Bu pikin, GaAsPN’in  $E_-$  seviyesinden valans bandına geçişe karşılık geldiği ve GaAsPN’nin yasak enerji aralığını verdiği söylenebilir. GaAsPN’in bant aralığının, literatürde verilen benzer P ve As alaşım oranına sahip GaAsP’in bant aralığı ile kıyaslandığında, daha düşük olduğu görüldü [49]. Bunun sebebi olarak, yapıya giren azotun bant aralığını azalttığı düşünülebilir.

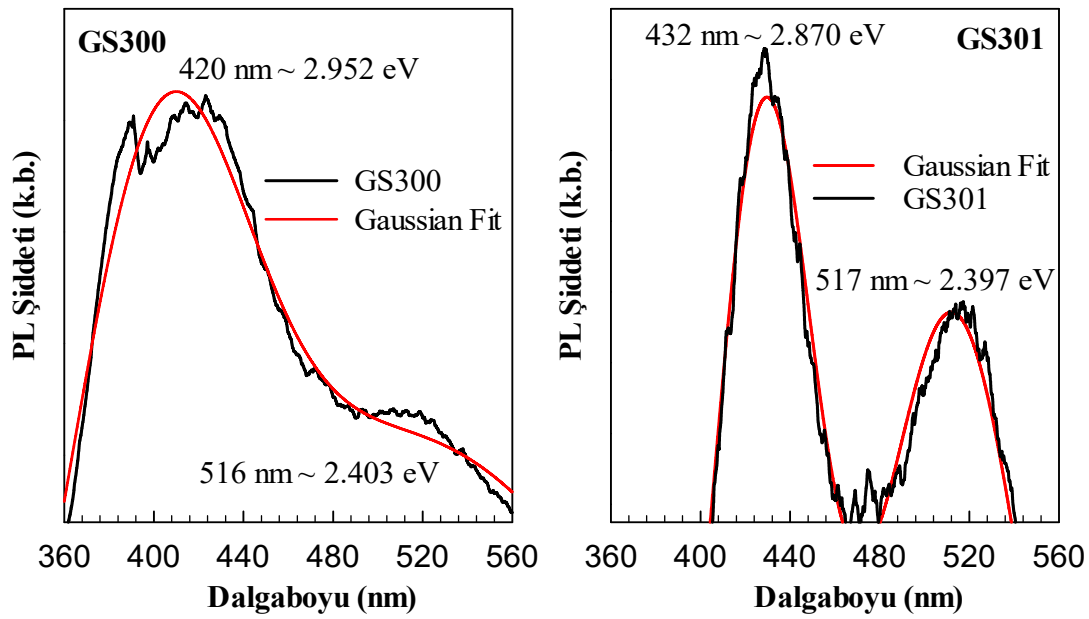
GS295 ve GS298 numunelerinin PL spektrumundan elde edilen lüminesans enerjileri, BAC modeli ile hesaplanan enerjiler ile karşılaştırıldı. Bunun için, HRXRD kırınım desenlerinin LEPTOS programı ile simüle edilmesiyle belirlenen alaşım oranları, Eş. 2.4 ve Eş. 2.5’de verilen BAC modeli denklemleri kullanıldı. Birbirleriyle uyumlu oldukları görülen sonuçlar, Çizelge 4.12’de verildi.



Şekil 4.18. GS295 ve GS298 numunelerinin PL spektrumları

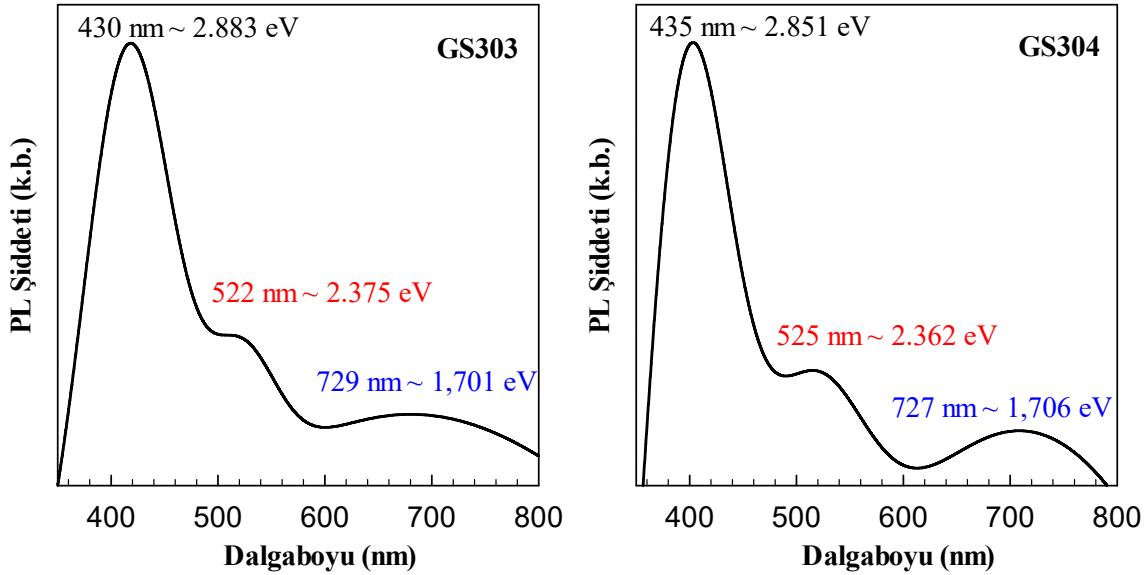
Çizelge 4.12. GS295 ve GS298 numunelerinin PL ve BAC sonuçlarının kıyaslanması

| Numune | PL                  |            | BAC Modeli          |            |
|--------|---------------------|------------|---------------------|------------|
|        | $E_- \sim E_g$ (eV) | $E_+$ (eV) | $E_- \sim E_g$ (eV) | $E_+$ (eV) |
| GS295  | 2,023               | 2,427      | 2,040               | 2,399      |
| GS298  | 1,632               | ---        | 1,645               | 2,344      |



Şekil 4.19. GS300 ve GS301 numunelerinin PL spektrumları

Si alttaş üzerine iki farklı yöntem kullanılarak GaP tabakası büyütülen GS300 ve GS301 GaP/Si kalibrasyon numunelerinin gaussian fit uygulanmış PL spektrumları Şekil 4.19’da verildi. Spektrumlar incelendiğinde, 420 nm ve 432 nm (2,952 ve 2,870 eV) ile 516 ve 517 nm (2,403 ve 2,397 eV)’de gözlenen piklerin GaP’ın lüminesans pikleri olduğu ve yaklaşık olarak GaP’ın bant aralıklarına karşılık geldiği söylenebilir. Literatürde GaP’ın bant aralığı 2,26 eV (direkt) ve 2,78 eV (indirekt) olarak verilmektedir [24]. PL spektrumlarından elde edilen değerler literatürden biraz farklı, ancak deneysel hata sınırları içinde birbirleriyle uyumludur. GS301 numunesindeki lüminesans piklerinin, GS300 numunesine göre daha şiddetli ve daha dar olduğu görülmektedir. Bu durum, GS301 numunesinde daha yüksek krsital kalitesine sahip GaP/Si yapısının elde edildiğini, HRXRD sonuçlarıyla da uyumlu olarak, göstermektedir.



Şekil 4.20. GS303 ve GS304 numunelerinin PL spektrumları

Si alttaş üzerine büyütülen GS303 ve GaP alttaş üzerine büyütülen GS304 numunelerinin gaussian fit uygulanmış PL spektrumları Şekil 20’de verildi.

GS303 numunesinin spektrumu incelendiğinde, yaklaşık 430 nm’de (2,883 eV) ve 522 nm’de (2,375 eV) bulunan piklerin GaP tampon tabakasına, 729 nm’de (1,701 eV) bulunan pikin ise GaAsPN’a ait lüminesans piki olduğu düşünülmektedir. GS304 numunesinin spektrumu incelendiğinde ise, 435 nm’de (2,851 eV) ve 525 nm’de (2,362 eV) bulunan piklerin GaP’a ait lüminesans pikleri olduğu, 727 nm’de (1,706 eV) bulunan pikin ise GaAsPN ait lüminesans piki olduğu düşünülmektedir.

GS303 ve GS304 numunelerinin PL spektrumlarından elde edilen GaAsPN'a ait bant aralıklarının, literatürde verilen benzer P ve As alaşım oranına sahip GaAsP'nin bant aralığı ile kıyaslandığında, daha düşük olduğu görüldü [49]. Bunun sebebi olarak, yapıya giren azotun bant aralığını azalttığı düşünülebilir. GaAsPN tabakasına ait lüminesans piklerinin, her iki numunede de düşük şiddet ve yüksek pik genişliğine sahip olduğu görüldü. Bu durumun sebebinin, yapıdaki azot kaynaklı kristal kusurları ve iletkenlik bandı yakınlarındaki kusur seviyeleri olduğu düşünülmektedir.

GS303 ve GS304 numunelerinin PL spektrumundan elde edilen lüminesans enerjileri, BAC modeli ile hesaplanan enerjiler ile karşılaştırıldı. Bu amaçla, HRXRD kırınım desenlerinin LEPTOS programı ile simüle edilmesiyle belirlenen alaşım oranları, Eş. 2.4 ve Eş. 2.5'de verilen BAC modeli denklemleri kullanıldı. Birbirleriyle uyumlu oldukları görülen sonuçlar, Çizelge 4.13'de verildi.

Çizelge 4.13. GS303 ve GS304 numunelerinin PL ve BAC sonuçlarının kıyaslanması

|        | $E \sim E_g$ (eV) BAC Modeli | $E \sim E_g$ (eV) PL | Literatür |
|--------|------------------------------|----------------------|-----------|
| Numune | GaAsPN                       | GaAsPN               | GaAsP     |
| GS303  | 1,716                        | 1,701                | 1,95      |
| GS304  | 1,727                        | 1,706                | 1,96      |

### 4.3. Diyot Fabrikasyonu ve Akım-Gerilim (I-V) Ölçümleri

p-n eklem yapıları sahip olan GS295, GS298, GS303 ve GS304 numunelerinin diyot fabrikasyonları, farklı metalizasyon teknikleri ve farklı kontak malzemeleri kullanılarak yapıldı. Diyot fabrikasyonları tamamlanan numunelerin akım-gerilim (I-V) ölçümleri gerçekleştirildi.

#### 4.3.1. Diyot fabrikasyonu

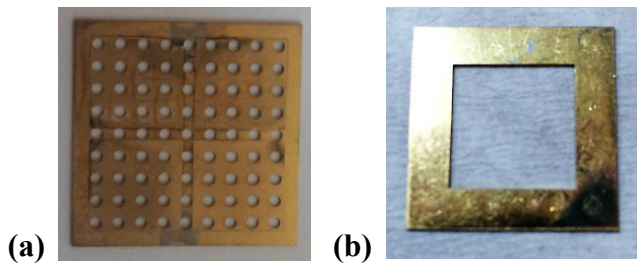
Diyot fabrikasyon çalışmalarında ilk olarak, GS295 ve GS298 numuneleri kullanıldı. Her iki numuneden de 5x5 mm boyutlarında ikiye parça kesildi ve yaklaşık 10 nm kalınlığındaki katkısız GaP kep tabakaları, 2HCl:1HNO<sub>3</sub>:2H<sub>2</sub>O kimyasal aşındırma çözeltisi ile kaldırıldı. GS295\_Au ve GS298\_Au olarak isimlendirilen numunelerden birer parçanın ön ve arka

yüzeylerinde, püskürtme sistemi kullanılarak Altın (Au) kontaklar oluşturuldu. GS295\_AuNiGe ve GS298\_AuNiGe olarak isimlendirilen diğer parçaların yüzeylerinde ise vakum-buharlaştırma sistemiyle, literatürdeki GaP üzerinde ohmik kontak oluşturma proseslerinden faydalanarak, AuNiGe kontaklar oluşturuldu [50]. Numuneler, kontakların ohmik özellik göstermesi için tavlandı. I-V ölçümleri alındı ve karşılaştırmalı olarak analiz edildi.

GS303 ve GS304 numunelerinin 5×5 mm boyutlarında kesilen parçalarının ön yüzeyinde AuZn, arka yüzeyinde ise AuNiGe kontaklar, vakum-buharlaştırma sistemi kullanılarak oluşturuldu. Numuneler, kontakların ohmik özellik göstermesi için hızlı ısı tavlama (RTA) cihazında farklı sıcaklıklarda tavlandı. I-V ölçümleri alındı ve karşılaştırmalı olarak analiz edildi.

#### GS295 ve GS298 numunelerinde Au ohmik kontak oluşturulması

GS295 ve GS298 numunelerinden kesilen parçalar, aseton ve alkol ile temizlendi, kuru azot ile kurutuldu. Numunelerin ön ve arka yüzeylerinde oluşturulan kontaklar için, öncelikle ön yüzey kaplamasında yuvarlak delikli maske (Resim 4.1.a) ardından arka yüzey kaplamasında ise kare maske (Resim 4.2.b) kullanıldı. Maskeler, numunelerin üzerine gelecek şekilde numune tutucuya sabitlenerek püskürtme sistemine yüklendi. Numunelerin püskürtme sistemine yüklenmesinin hemen ardından, sistem vakum altına alındı. Sistem, Çizelge 4.14’de verilen vakum değerlerine ulaştığında, ön ve arka yüzey kaplama işlemleri yine Çizelge 4.14’de verilen parametreler kullanılarak gerçekleştirildi.



Resim 4.1. (a) Yuvarlak delikli maske, (b) Kare maske

Çizelge 4.14. Ön ve arka yüzey Au kaplama parametreleri

|                                  | Ön Yüzey              | Arka Yüzey            |
|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| $P_{Taban}$ (mbar)               | $6,83 \times 10^{-7}$ | $7,72 \times 10^{-7}$ |
| $P_{Ar}$ (mbar)                  | $2,1 \times 10^{-3}$  | $3,46 \times 10^{-3}$ |
| DC Güç (W)                       | 100                   | 100                   |
| Kaplama oranı ( $\text{\AA}/s$ ) | 3,8                   | 3,4                   |
| $T_{Alttas}$ ( $^{\circ}C$ )     | Oda sıcaklığı         | Oda sıcaklığı         |
| Au kalınlığı ( $\text{\AA}$ )    | 1500                  | 1500                  |
| Argon akışı (sccm)               | 12                    | 12                    |

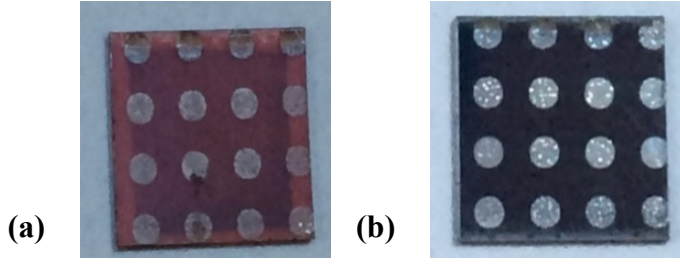
Ön ve arka yüzeylerine Au kaplanan numunelerin kontaklarının ohmik özellik göstermesi için, püskürtme sistemi içerisinde,  $N_2$  ortamında ve  $360^{\circ}C$ 'de, 10 dakika boyunca tavlandı.

#### GS295 ve GS298 numunelerinde AuNiGe ohmik kontak oluşturulması

GS295 ve GS298 numunelerinden kesilen parçalar, aseton ve alkol ile temizlendi, kuru azot ile kurutuldu. Numunelerin ön ve arka yüzeylerinde oluşturulan kontaklar için, öncelikle ön yüzey kaplamasında yuvarlak delikli maske (Resim 4.1.a) ardından arka yüzey kaplamasında kare maske (Resim 4.1.b) kullanıldı. Maskeler, numunelerin üzerine gelecek şekilde numune tutucuya sabitlenerek vakum-buharlaştırma sistemine yüklendi. Numunelerin vakum-buharlaştırma sistemine yüklenmesinin hemen ardından, sistem vakum altına alındı. Sistem yeterli vakum değerine ulaştıktan sonra, kaplama işlemine başlandı. Kontak malzemesi olarak AuNiGe alaşımı kullanıldı. Ön ve arka yüzey kaplama parametreleri Çizelge 4.15'de verildi. Ön kontakları oluşturulmuş numunelere ait resimler Resim 4.2'de verildi.

Çizelge 4.15. Ön ve arka yüzey AuNiGe kaplama parametreleri

|                                   | Ön Yüzey              | Arka Yüzey            |
|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| $P_{Taban}$ (mbar)                | $1,37 \times 10^{-6}$ | $2,10 \times 10^{-5}$ |
| $P_{Kaplama}$ (mbar)              | $1,02 \times 10^{-5}$ | $4,05 \times 10^{-5}$ |
| Kaplama oranı ( $\text{\AA}/s$ )  | 2,0                   | 2,0                   |
| $T_{Alttas}$ ( $^{\circ}C$ )      | Oda sıcaklığı         | Oda sıcaklığı         |
| AuNiGe kalınlığı ( $\text{\AA}$ ) | 2000                  | 2000                  |
| Gerilim (V) - Akım (A)            | 1,810 V - 256,3 A     | 1,813 V - 256,3 A     |



Resim 4.2. (a) GS295, (b) GS298 numunelerinin ön yüzey AuNiGe kontakları

Ön ve arka yüzeylerine AuNiGe kaplanan numunelerin kontaklarının ohmik özellik göstermesi için RTA sisteminde, N<sub>2</sub> ortamında tavlandı. Tavlama parametreleri Çizelge 4.16’da verildi.

Çizelge 4.16. GS295 ve GS298 numunelerinin tavlama parametreleri

|                           |                       |
|---------------------------|-----------------------|
| $P_{Taban} (mbar)$        | $5,30 \times 10^{-5}$ |
| $P_{N_2} (mbar)$          | $2,12 \times 10^{-3}$ |
| $T_{Tavlama} (^{\circ}C)$ | 350                   |
| $Süre (dakika)$           | 5                     |

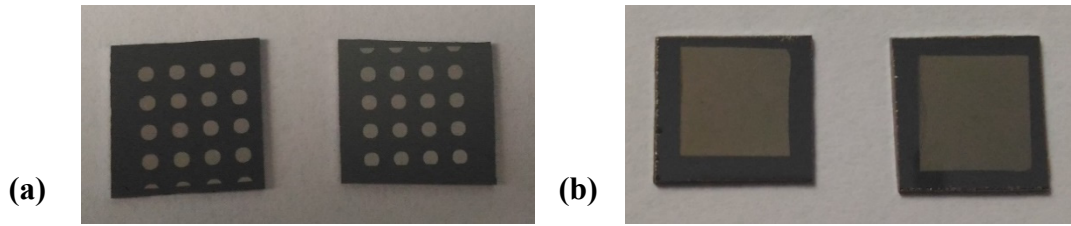
#### GS303 ve GS304 numunelerinde AuZn ve AuNiGe ohmik kontak oluşturulması

GS303 ve GS304 numunelerinden kesilen parçalar, aseton ve alkol ile temizlendi, kuru azot ile kurutuldu. Numunelerin ön ve arka yüzeylerinde oluşturulan kontaklar için, öncelikle ön yüzey kaplamasında yuvarlak delikli maske (Resim 4.1.a) ardından arka yüzey kaplamasında kare maske (Resim 4.1.b) kullanıldı. Maskeler, numunelerin üzerine gelecek şekilde numune tutucuya sabitlenerek vakum-buharlaştırma sistemine yüklendi. Numunelerin vakum-buharlaştırma sistemine yüklenmesinin hemen ardından, sistem vakum altına alındı. Sistem yeterli vakum değerine ulaştıktan sonra, kaplama işlemine başlandı. Kontak malzemesi olarak ön yüzeyde, literatürde p-GaP üzerinde ohmik kontak oluşturulmasında kullanılan AuZn alaşımı, arka yüzeyde ise n-GaP için AuNiGe alaşımı kullanıldı [51]. Ön ve arka yüzey kaplama parametreleri Çizelge 4.17’de verildi. Ön ve arka kontakları oluşturulmuş numunelere ait resimler Resim 4.3’de verildi.

Çizelge 4.17. Ön yüzey AuZn, arka yüzey AuNiGe kaplama parametreleri

|                                        | Ön Yüzey (AuZn)       | Arka Yüzey (AuNiGe)   |
|----------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| $P_{Taban}$ (mbar)                     | $4,09 \times 10^{-6}$ | $4,08 \times 10^{-6}$ |
| $P_{Kaplama}$ (mbar)                   | $3,3 \times 10^{-5}$  | $6,72 \times 10^{-5}$ |
| Kaplama oranı ( $\text{\AA}/s$ )       | 1,7                   | 1,8                   |
| $T_{Alttas}$ ( $^{\circ}C$ )           | Oda sıcaklığı         | Oda sıcaklığı         |
| AuZn/AuNiGe kalınlığı ( $\text{\AA}$ ) | 2000                  | 2000                  |
| Gerilim (V) - Akım (A)                 | 2,108 V - 256,3 A     | 2,113 V - 256,3 A     |

Ön yüzeylerine AuZn, arka yüzeylerine AuNiGe kaplanan GS303 numunesinden üç parça, GS304'den iki parça kesildi. Parçalar, kontaklarının ohmik özellik göstermesi için RTA sisteminde, N<sub>2</sub> ortamında ve farklı sıcaklıklarda tavlandı. Tavlama parametreleri Çizelge 4.18'de verildi.



Resim 4.3. GS303 ve GS304 numunelerinin, (a) ön yüzey, (b) arka yüzey kontakları

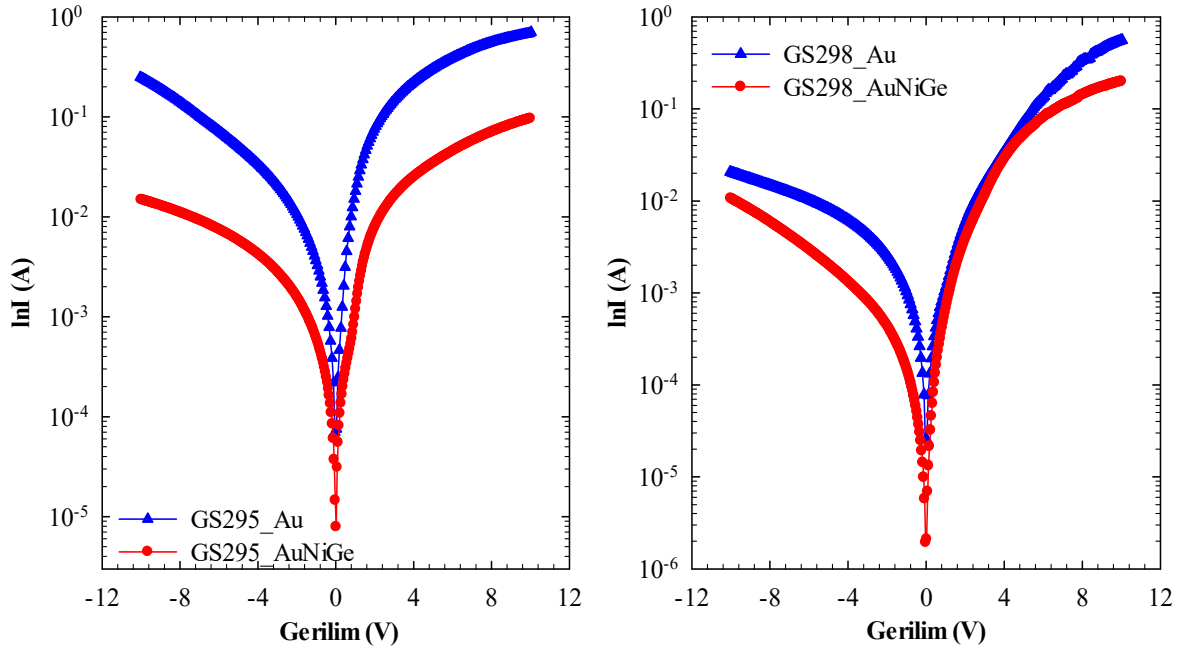
Çizelge 4.18. GS303 ve GS304 numunelerinin tavlama parametreleri

| Numune | $P_{Taban}$ (mbar)    | $P_{N_2}$ (mbar)      | $T_{Tavlama}$ ( $^{\circ}C$ ) | Süre (dakika) |
|--------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------|---------------|
| GS303  | $4,61 \times 10^{-5}$ | $2,11 \times 10^{-3}$ | 350                           | 5             |
|        | $3,15 \times 10^{-5}$ | $1,96 \times 10^{-3}$ | 400                           | 5             |
| GS304  | $4,61 \times 10^{-5}$ | $2,11 \times 10^{-3}$ | 350                           | 5             |
|        | $3,15 \times 10^{-5}$ | $1,96 \times 10^{-3}$ | 400                           | 5             |

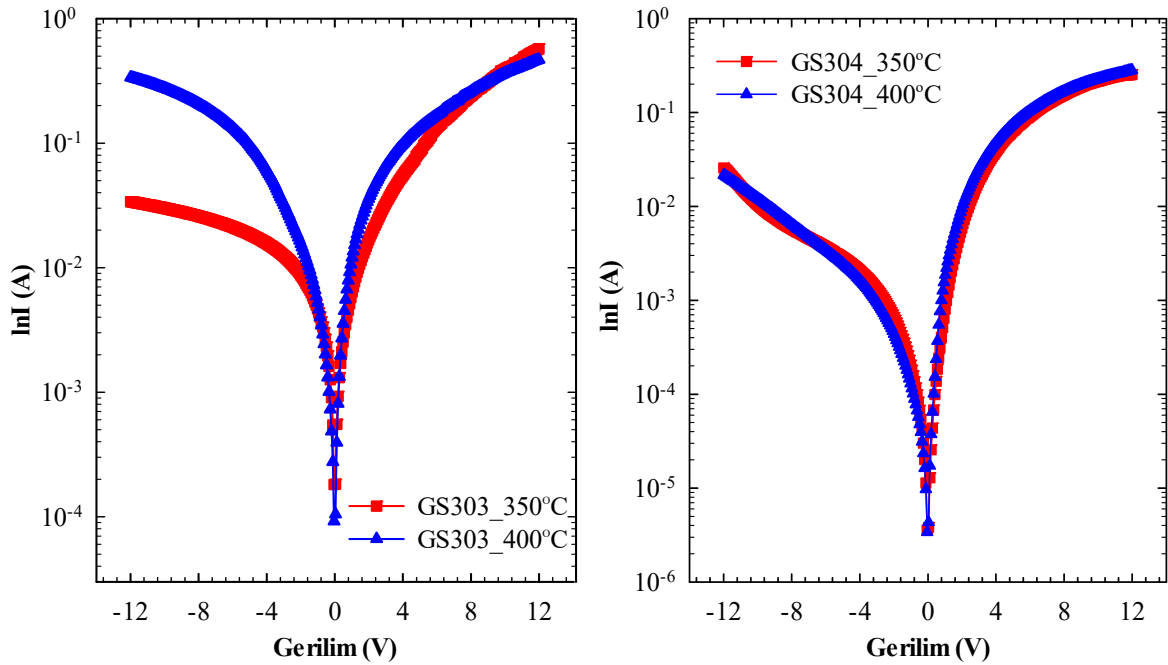
#### 4.3.2. Akım-Gerilim (I-V) ölçümleri

Ohmik kontakları oluşturulmuş numunelerin oda sıcaklığındaki akım-gerilim (I-V) ölçümleri, Keithley-4200 ölçüm sistemi kullanılarak yapıldı. Farklı kontak malzemeleri ile fabrike edilen GS295 ve GS298 numunelerinin karşılaştırmalı  $\ln(I)$ -V grafikleri, Şekil

4.21’de verildi. Farklı sıcaklıklarda tavlanan GS303 ve GS304 numunelerinin karşılaştırmalı  $\ln(I)$ -V grafikleri ise Şekil 4.22’de verildi.



Şekil 4.21. GS295 ve GS298 numunelerinin karşılaştırmalı  $\ln(I)$ -V grafikleri



Şekil 4.22. GS303 ve GS304 numunelerinin farklı tavlama sıcaklıklarında  $\ln(I)$ -V grafikleri

Numunelerin  $\ln(I)$ -V grafikleri incelendiğinde, diyot karakteristiğine uydukları görülmektedir [52]. Bu grafiklerden elde edilen veriler ve gerekli formüller kullanılarak,

diyotların elektriksel parametreleri (idealite faktörü ( $\eta$ ), ters doyum akımı ( $I_0$ ) ve potansiyel engel yüksekliği ( $\Phi_B$ )) bulundu. Elektriksel parametrelerin belirlenmesinde, aşağıda açıklanan yöntem ve formüller kullanıldı.

Diyot gibi seri dirence sahip yapılarda, doğru beslem gerilimi (V) ile akımın (I) ilişkisi, termiyonik emisyon teorisine göre Eş. 4.1 ile verilir [52].

$$I = I_0 \exp\left(\frac{q(V-IR_s)}{\eta kT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{q(V-IR_s)}{kT}\right)\right] \quad (4.1)$$

Burada V doğru beslem gerilimi,  $\eta$  yapının idealite faktörü,  $R_s$  seri direnç,  $I_0$  ise ters beslem doyum akımıdır. Bu denklemde  $I_0$ ,  $\ln(I)$ -V grafiğinde eğrinin lineer bölgesinin sıfır gerilim değerinde akım eksenine fit edilmesi ile elde edilir ve Eş. 4.2 ile verilir.

$$I_0 = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{B_0}}{kT}\right) \quad (4.2)$$

Burada A,  $\text{cm}^2$  cinsinden diyot alanı,  $A^*$  ise Richardson sabitidir (Si için Richardson sabiti  $112 \text{ A.cm}^{-2}.\text{K}^{-2}$ , GaP için ise  $50 \text{ A.cm}^{-2}.\text{K}^{-2}$  'dir [53, 54].)  $\Phi_{B_0}$ , eV cinsinden sıfır beslem engel yüksekliğidir ve Eş.4.2 ile hesaplanır. Eş. 4.1 ve Eş 4.2 kullanılarak diyot için idealite faktörü ( $\eta$ ) Eş. 4.3 ile hesaplanır.

$$\eta = \frac{q}{kT} \left( \frac{dV}{d \ln(I)} \right) \quad (4.3)$$

Burada  $dV/d \ln(I)$  terimi, yarı-logaritmik  $\ln(I)$ -V grafiğinin lineer bölgesinin eğimidir.

Numunelerin diyot aygıt parametreleri, Eş. 4.2 ve Eş 4.3 kullanılarak hesaplandı ve Çizelge 4.19'da verildi.

Çizelge 4.19. Numunelerin oda sıcaklığında diyot aygıt parametreleri

| <i>Numune</i> | $I_0 (A)$             | $\eta$ | $\Phi_B (eV)$ |
|---------------|-----------------------|--------|---------------|
| GS295_Au      | $1,15 \times 10^{-4}$ | 5,80   | 0,54          |
| GS295_AuNiGe  | $2,04 \times 10^{-5}$ | 5,33   | 0,59          |
| GS298_Au      | $2,97 \times 10^{-5}$ | 5,97   | 0,58          |
| GS298_AuNiGe  | $4,21 \times 10^{-6}$ | 4,48   | 0,63          |
| GS303_350°C   | $1,93 \times 10^{-4}$ | 5,45   | 0,55          |
| GS303_400°C   | $2,24 \times 10^{-4}$ | 6,12   | 0,55          |
| GS304_350°C   | $6,73 \times 10^{-6}$ | 5,75   | 0,61          |
| GS304_400°C   | $8,91 \times 10^{-6}$ | 5,43   | 0,61          |

ln(I)-V grafikleri ve Çizelge 4.19’da verilen değerler incelendiğinde, metalizasyon malzemesinin değiştirilmesinin veya numunenin tavlanması, aygıtın çıktı parametrelerini doğrudan etkilediği açıkça görülmektedir. GS295 ve GS298 numuneleri kullanılarak üretilen diyotlar için bu durum incelendiğinde; AuNiGe alaşımı ile metalizasyonu tamamlanmış aygıtın, yalnız Au metali kullanılarak metalizasyonu tamamlanmış aygıtla göre, daha düşük doyum akımına, daha düşük idealite faktörüne ve daha yüksek potansiyel engel yüksekliğine sahip olduğu görülmektedir. Buna göre, AuNiGe alaşımı ile metalizasyonu tamamlanmış aygıtların daha iyi bir performansa sahip olduğu söylenebilir. GS303 numaralı numune kullanılarak fabrike edilen diyot göz önüne alındığında, 350°C’de tavlanmış örneğin; GS304 numaralı numune göz önüne alındığında ise, 400°C’de tavlanmış örneğin; daha iyi elektriksel parametrelere (daha düşük doyum akımına, daha düşük idealite faktörüne ve daha yüksek potansiyel engel yüksekliğine) sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, üretilen aygıtların hangi alttaşa sahip olduğunun da aygıtın çıktı parametreleri açısından önemli olduğunu göstermektedir. Numunelerin idealite faktörlerinin, literatürde yer alan diyot fabrikasyonu yapılmış seyreltik azotlu p-n eklem yapılar ile kıyaslandığında, uyumlu sonuçlara sahip olduğu görülmektedir [55].

## 5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, seyreltik azotlu p-n eklem yapıları, MBE tekniği ile Si ve GaP alttaşlar üzerine, yüksek kristal kalitesinde büyütüldü. Büyütülen yapıların elektriksel özellikleri Hall etkisi ölçüm sonuçlarının, yapısal özellikleri yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınım (HRXRD) desenlerinin ve optik özellikleri ise fotoluminesans (PL) spektrumlarının analiz edilmesi ile belirlendi. Ayrıca diyot fabrikasyonu yapılan p-n eklem yapıların akım-gerilim (I-V) ölçüm sonuçları incelendi ve aygıt parametreleri hesaplandı.

Seyreltik azotlu yarıiletkenlerde taşıyıcı yoğunluğunu belirlemek ve istenilen taşıyıcı yoğunluğuna sahip seyreltik azotlu p-n eklem yapıları oluşturabilmek için p-tipi ve n-tipi olarak katkılanmış GaPN katkı kalibrasyon numuneleri, Si alttaş üzerine ayrı ayrı büyütüldü. Büyütmelerde katkı yoğunluklarının yaklaşık  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  civarında olması hedeflendi. Ayrıca bu büyütmelerde, Si alttaş üzerine GaP ve GaPN büyütülmesinde kullanılan iki farklı yöntem denendi. Sırasıyla n-tipi ve p-tipi olarak katkılanan, GS289 ve GS293 olarak isimlendirilen katkı kalibrasyon numunelerinin Hall etkisi ölçümleri ile elde edilen taşıyıcı yoğunlukları,  $6,3078 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  ve  $1,6816 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  olarak bulundu. Numunelerin, sonraki adımlarda üretilecek p-n eklem yapıları için yeterli taşıyıcı yoğunluğuna sahip oldukları söylenebilir. Si alttaş üzerine büyütülen katkı kalibrasyon numunelerinin HRXRD kırınım desenleri incelendiğinde, GaPN tabakasına ait piklerin belirgin olmadığı görüldü. Bu durum, Si-GaP ara yüzeyinde oluşan AFB'lerden ve diğer yapısal kusurlardan kaynaklanmaktadır.

Katkı kalibrasyon numuneleri ile hedeflenen taşıyıcı yoğunluklarına ulaşıldıktan sonra GaP alttaş üzerine, GS295 olarak adlandırılan numunede p-GaPN/n-GaP, GS298 olarak adlandırılan numunede ise p-GaAsPN/n-GaP farklı tür p-n eklem (heteroeklem) yapıları büyütüldü. Numunelerin HRXRD ölçümleri yapıldı ve kırınım desenleri analiz edildi. Her iki numunede de en şiddetli pik, GaP alttaşın (400) kırınımına aittir. GS295 numunesinde GaP pikinin sağında oluşan omuzun GaPN tabakasına ait olduğu, GS298 numunesinde ise, GaP pikinin solunda oluşan  $66,19^\circ$ 'deki kırınım pikinin GaAsPN tabakasına ait olduğu belirlendi. HRXRD kırınım desenlerinin LEPTOS programı yardımıyla simüle edilmesiyle alaşım oranları bulundu. GS295 ve GS298 numunelerinde azot oranlarının sırasıyla %0,33 ve %0,80 olduğu belirlendi. Numunelerin, hedeflendiği gibi düşük azot oranına sahip olacak şekilde büyütüldüğü görüldü.

GS295 numunesinin PL spektrumundan, GaPN'in E<sub>+</sub> seviyesinden valans bandına ve E<sub>-</sub> seviyesinden valans bandına geçişe karşılık gelen lüminesans pikleri belirlendi. Literatürle uyumlu olarak yapıya giren azotun, GaP'ın bant aralığını azalttığı görüldü. GS298 numunesinin PL spektrumu incelendiğinde ise, oluşan pikin GaAsPN lüminesans piki olduğu ve GaAsPN'in E<sub>-</sub> seviyesinden valans bandına geçişe karşılık gelerek yasak enerji aralığını verdiği söylenebilir. GaAsPN'in bant aralığının, literatürde verilen benzer P ve As alaşım oranına sahip GaAsP'ın bant aralığından daha düşük olduğu görüldü. Bu durum, yapıya giren azotun bant aralığını azalttığı şeklinde yorumlandı. GS295 ve GS298 numunelerinin PL spektrumundan elde edilen lüminesans enerjileri, BAC modeli ile hesaplanan enerjiler ile karşılaştırıldı. Bunun için, HRXRD kırınım desenlerinin LEPTOS programı ile simüle edilmesiyle belirlenen alaşım oranları ve BAC modeli denklemleri kullanıldı. Elde edilen sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görüldü.

Si alttaş üzerinde yüksek kristal kalitesine sahip seyreltik azotlu p-n eklem yapıların oluşturulabilmesi için farklı yöntemler kullanılarak GaP/Si kalibrasyon numuneleri büyütüldü. Numunelerde, [110] doğrultusu boyunca 4° açıyla kesilmiş Si (100) alttaşlar kullanıldı. GS300 olarak isimlendirilen numunede, Si alttaş üzerine P<sub>2</sub> akısı gönderildi, ardından GaP büyütüldü ve sıcaklık adım artımlı olarak arttırılıp tavlama yapıldı. GS301 numunesinde ise Si alttaş üzerine MEE yöntemi ile ince katman GaP büyütüldü, ardından GaP tabakası büyütüldü ve sıcaklık adım artımlı olarak arttırılıp tavlama yapıldı. GS300 ve GS301 numunelerinin HRXRD kırınım desenleri incelendiğinde, GS301 numunesinde GaP tabakasına ait omuzlanma belirgin iken GS300 numunesinde GaP'a ait omuzlanma gözlenemedi. Literatürle uyumlu bir biçimde, GaP kırınım pikinin, Si alttaş pikine bitişik bir omuz şeklinde oluştuğu görüldü. Ayrıca, GS300 ve GS301 numunelerinin PL spektrumları incelendiğinde GaP'a ait lüminesans pikleri gözlemlendi. GS301 numunesindeki lüminesans piklerinin, daha şiddetli ve daha dar olması, bu numunede daha yüksek kristal kalitesine sahip GaP tabakasının büyütüldüğüne atfedilebilir. GaP/Si büyütülmesinde ideal yöntemin, belirli bir yönelimle kesilmiş alttaş MEE tekniği ile bir çekirdekleşme tabakası oluşturulması, ardından GaP tabakasının büyütülmesi ve numunenin tavlama yapıldığı belirlendi.

Si alttaş üzerine, daha önce belirlenen yöntem kullanılarak büyütülen GS303 ve GaP alttaş üzerine büyütülen GS304 p-n eklem GaAsPN numunelerinin karakterizasyonları yapıldı. Numunelerin HRXRD kırınım desenleri incelendiğinde, en şiddetli piklerin alttaştan

kaynaklanan kırınım pikleri olduğu,  $65,99^\circ$  ve  $66,01^\circ$ 'lerde oluşan piklerin ise GaAsPN tabakasına ait kırınım pikleri olduğu belirlendi. Bu desenlere ait pik yarı-genişlikleri  $0,59^\circ$  ve  $0,52^\circ$  olarak belirlendi. Beklenilenden yüksek olan bu değerlerin, yapısal kusurlardan kaynaklandığı düşünülmektedir. GS303 ve GS304 numunelerinin PL spektrumları incelendiğinde, her iki numunede de GaP ve GaAsPN'a ait olduğu düşünülen lüminesans pikleri gözlemlendi. GaAsPN tabakasına ait lüminesans piklerinin, her iki numunede de düşük şiddet ve yüksek pik genişliğine sahip olduğu görüldü. Bu durumun sebebinin, yapıdaki azot kaynaklı kristal kusurları ve iletkenlik bandı yakınlarındaki kusur seviyeleri olduğu düşünülmektedir.

Son olarak p-n eklem yapılarına sahip olan GS295, G298, GS303 ve GS304 numunelerinin diyot aygıt fabrikasyonları tamamlandı. Ardından, I-V ölçümleri alınarak, aygıt parametreleri hesaplandı. Numunelerin diyot fabrikasyonları için farklı teknikler ve farklı kontak malzemeleri denendi. GS295 ve GS298 numunelerinin birer parçasında püskürtme sistemiyle Au, birer parçasında ise vakum-buharlaştırma sistemiyle AuNiGe kontaklar oluşturuldu. Oda sıcaklığında alınan I-V ölçüm sonuçları analiz edildiğinde, farklı iki kontak malzemesine sahip numunenin de diyot özelliği gösterdiği, AuNiGe alaşımıyla oluşturulan diyotun daha düşük idealite faktörü, daha düşük doyum akımı ve daha yüksek potansiyel engel yüksekliğine sahip olduğu belirlendi. GS303 ve GS304 numunelerinin kontak oluşumunda AuNiGe alaşımı kullanıldı ve ohmik kontak oluşumu için farklı sıcaklıklarda tavlandı. Tavlama sıcaklığının elektriksel parametrelere etki ettiği, Si alttaşa sahip GS303 numunesinde  $350^\circ\text{C}$ , GaP alttaşa sahip GS304 numunesinde ise  $400^\circ\text{C}$ 'de tavlamanın optimum aygıt parametrelerini verdiği görüldü. I-V analizlerinin sonuçları irdelendiğinde; kontak malzemesinin, tavlama sıcaklığının ve kullanılan alttaşın, üretilen diyotun elektriksel parametrelerine büyük ölçüde etki ettiği anlaşılmaktadır.

Sonuç olarak bu tez çalışmasında, seyreltik azotlu p-n eklem yapılar, Si ve GaP alttaşlar üzerine başarıyla büyütüldü. Büyütülen numuneler farklı karakterizasyon sistemleri ile analiz edildi. Analiz sonuçlarının birbiriyle ve literatürle uyumlu olduğu görüldü. Numunelerin diyot aygıt fabrikasyonları yapıldı ve elektriksel parametreleri belirlendi. Bu çalışmanın, ileriki çalışmalarda seyreltik azotlu yapılardan oluşturulacak LED gibi optoelektronik cihazların üretimine yol gösterici rol üstleneceğini düşünmekteyiz.



## KAYNAKLAR

1. Neamen, D. A. (2003). *Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles* (Third Edition). New York/USA: McGraw-Hill, 1-10.
2. Boylestad, R. and Nashelsky, L. (1998). *Electronic Devices and Circuit Theory* (Seventh Edition). New York/USA: Prentice-Hall, 3-42.
3. Seeger, K. (2004). *Semiconductor Physics: An Introduction* (Ninth Edition). Berlin/Germany: Springer-Verlag, 10- 32.
4. Streetman, B. G. and Banerjee, S. K. (2006). *Solid State Electronic Devices* (Sixth Edition). New Jersey/USA: Prentice-Hall, 1-94, 154-167.
5. Shackelford, J. F. (2005). *Introduction to Materials Science for Engineers* (Sixth Edition). New Jersey/USA: Pearson Education, 623-665.
6. Hecht, J. (2008). *Understanding Lasers: An Entry Level Guide* (Third Edition). New Jersey/USA: IEEE Pres, 270-300.
7. Sze, S. M. and K. Ng, K. (2006). *Physics of Semiconductor Devices* (Third Edition). New Jersey/USA: John Wiley & Sons, 79-129.
8. Sarı, H. (2008). *2008-2009 Güz Dönemi Optoelektronik Dersi*. Ders Notu, Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği Bölümü, Ankara.
9. Oura, K., Lifshits, V. G., Saranin, A. A., Zotov, A. V. and Katayama, M. (2003). *Surface Science: An Introduction*. Berlin/Germany: Springer-Verlag, 377-382.
10. Hudait, M. K., Lin, Y., Palmisiano, M. N., Tivarus, C., Pelz J. P. and Ringel, S. A. (2004). Comparison of mixed anion,  $\text{InAs}_y\text{P}_{1-y}$  and mixed cation,  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  metamorphic buffers grown by molecular beam epitaxy on (100) InP substrates. *Journal of Applied Physics*, 95(8), 3950-3560.
11. Harris, J. S., Kudrawiec, R., Yuen, H. B., Bank, S. R., Bae, H. P., Wistey, M. A., Jackrel, D., Pickett, E. R., Sarmiento, T., Goddard, L. L., Lordi, V. and Gugov, T. (2007). Development of GaInNAsSb alloys: Growth, band structure, optical properties and applications. *Physica Status Solidi*, 224(8), 2707–2729.
12. Erol, A. (Editor). (2008). *Dilute III-V Nitride Semiconductors and Material Systems, Physics and Technology*. Berlin/Germany: Springer-Verlag, V-IX, 1-330.
13. Furukawa, Y., Yonezu, H., Ojima, K., Samonji, K., Fujimoto, Y., Momose, K. and Aiki, K. (2002). Control of N content of GaPN grown by molecular beam epitaxy and growth of GaPN lattice matched to Si(100) substrate. *Japanese Journal of Applied Physics*, 41(1), 528-532.

14. Bhat, R., Caneau, C., Salamanca-Riba, L., Bi, W. and Tu, C. (1998). Growth of GaAsN/GaAs, GaInAsN/GaAs and GaInAsN/GaAs quantum wells by low-pressure organometallic chemical vapor deposition. *Journal of Crystal Growth*, 195(7), 427-437.
15. Malikova, L., Pollak, F. H. and Bhat, R. (1998). Composition and temperature dependence of the direct band gap of GaAs<sub>1-x</sub>N<sub>x</sub> (0≤x≤0,0232) using contactless electroreflectance. *Journal of Electronic Materials*, 27(5), 484-487.
16. Keyes, B. M., Geisz, J. F., Dippo, P. C., Reedy, R., Kramer, C., Friedman, D. J. and Kurtz, S. R. (1999). Optical investigation of GaNAs, *AIP Conference Proceedings*, 462, 511-516.
17. Uesugi, K., Marooka, N. and Suemune, I. (1999). Reexamination of N composition dependence of coherently grown GaNAs band gap energy with high-resolution x-ray diffraction mapping measurements. *Applied Physics Letters*, 74(9), 1254-1256.
18. Wang, J. (2011). *Numerical analysis of bandgap & bowing parameter in In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N alloy with virtual crystal approximation (VCA) & dielektrik model (DM)*. University of Notre Dame Departman of Electrical Engineering, Indiana/USA.
19. Vurgaftman, I. and Meyer, J. R. (2001). Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys. *Applied Physics Reviews*, 89(11), 5815-5875.
20. Henini, M. (2005). *Dilute Nitride Semiconductors* (First Edition). Oxford/UK: Elsevier, 1-468.
21. Wu, J., Walukiewicz, W. and Haller, E. E. (2002). Band structure of highly mismatched alloys: Coherent potential approximation. *Physical Review B.*, 65(23), 1-4.
22. Shan, W., Yu, K. M., Walukiewicz, W., Wu, J., Ager, J. W. and Haller, E. E. (2004). Band Anticrossing in dilute nitrides. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 16, 3355-3372.
23. Ünsal, Ö. L., Gönül, B. and Temiz, M. (2014). A theoretical investigation of the band alignment of type-I direct band gap dilute nitride phosphide alloy of GaN<sub>x</sub>As<sub>y</sub>P<sub>1-x-y</sub>/GaP quantum well on GaP substrates. *Chinese Physics B*, 23(7), 1-5.
24. Levinshtein, M., Rumyantsev, S. and Shur, M. (1996). *Handbook Series on Semiconductor Parameters Volume 1: Si, Ge, C (Diamond), GaAs, GaP, GaSb, InAs, InP, InSb*. New Jersey/ABD: World Scientific, 104-119.
25. Vurgaftman, I. and Meyer, J.R. (2003). Band parameters for nitrogen-containing semiconductors. *Journal of Applied Physics*, 94(6), 3675-3696.
26. Xin, H. P., Tu, C. W., Zhang, Y. and Mascarenhas, A. (2000). Effects of nitrogen on the band structure of GaN<sub>x</sub>P<sub>1-x</sub> alloys. *Applied Physics Letters*, 76(10), 1267-1269.
27. Shan, W., Walukiewicz, W., Yu, K. M., Ager, J. W., Haller, E. E., Geisz, J. F., Friedman, D. J., Olson, J. M., Kurtz, S. R., Xin, H. P. and Tu, C. W. (2001). Band anticrossing in III-N-V alloys. *Physica Status Solidi (b)*, 223, 75-85.

28. Peternai, L., Kovac, J., Jakabovic, J., Vincze, A., Satka, A. and Gottschalch, V. (2005). Optical and structural investigation of GaN<sub>x</sub>P<sub>1-x</sub>/GaP structures for light emitting diodes. *Vacuum*, 80(1), 229-235.
29. Pulzara-Mora, A., Melendez-Lira, M., Jimenez-Saldoval, S. and Lopez-Lopez, M. (2006). Study of the structural and optical properties of GaPN thin films grown by magnetron RF sputtering. *Vacuum*, 80(5), 468-474.
30. Buyanova, I. A., Izadifard, M., Kasic, A., Arwin, H., Chen, W. M., Xin, H. P., Hong, Y. G. and Tu, C. W. (2004). Analysis of band anticrossing in GaN<sub>x</sub>P<sub>1-x</sub> alloys. *Physical Review B*. 70(8), 1-5.
31. Zhao, C. Z., Wei, T., Sun, X. D., Wang, S. S. and Lu K. Q. (2014). The factors contributing to the band gap bowing of the dilute nitride GaNP alloy. *Applied Physics A*, 117(3), 1447-1450.
32. Egorov, A. Y., Kryzhanovskaya, N. V. and Sobolev, M. S. (2011). Optical properties of quantum-confined heterostructures based on GaP<sub>x</sub>N<sub>y</sub>As<sub>1-x-y</sub> alloys. *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov*, 45(9), 1209-1213.
33. Orton, J. (2004). *The Story of Semiconductors* (First Edition). New York/USA: Oxford University Press, 149-152.
34. Yonezu, H. (2002). Control of structural defects in group III-V-N alloys grown on Si. *Semiconductor Science and Technology*, 17(8), 762-768.
35. Furukawa, Y., Yonezu, H., Wakahara, A., Ishiji, S., Moon, S. Y. and Morisaki, Y. (2007). Growth of Si/III-V-N/Si structure with two-chamber molecular beam epitaxy system for optoelectronic integrated circuits. *Journal of Crystal Growth*, 300(1), 172-176.
36. Yamane, K., Kawai, T., Furukawa, Y., Okada, H. and Wakahara, A. (2010). Growth of low defect density GaP layers on Si substrates with the critical thickness by optimized shutter sequence and post-growth annealing. *Journal of Crystal Growth*, 312(15), 2179-2184.
37. Yonezu, H., Furukawa, Y. and Wakahara, A. (2008). III-V epitaxy on Si for photonics applications. *Journal of Crystal Growth*, 310(23), 4757-4762.
38. Herman, M. A. and Sitter H. (1996). *Molecular Beam Epitaxy: Fundamentals and Current Status* (Second Edition). Berlin/Germany: Springer-Verlag, 1-265.
39. Hussein, E. H., Dadgostar, S., Hatami, F. and Masselink, W. T. (2015). Thermal annealing effect on the structural properties of epitaxial growth of GaP on Si substrate. *Journal of Crystal Growth*, 419, 42-46.
40. VG Semicon. (2000). *V80H-10 Molecular Beam Epitaxy System Operator's Manual*. East Grinstead/U.K.: VG- Semicon, 1-100.

41. Suryanarayana, C. and Norton M. G. (1998). *X-Ray Diffraction: A Practical Approach* (First Edition). New York/USA: Springer Science+Business Media, 3-18, 63-160.
42. Takaqi, S. (1962). Dynamical theory of diffraction applicable to crystals with any kind of small distortion. *Acta Crystallographica*, 15(12), 1311-1312.
43. Bruker AXS. (2008). *Diffract plus LEPTOS: The Comprehensive Nanometer X-ray Analysis Tool*. Karlsruhe/Germany: Bruker AXS, 1-8.
44. Armen, G. B. (2007). *Hall Effect Experiment*. The University of Tennessee Department of Physics and Astronomy, Tennessee/USA.
45. Utsumi, A., Furukawa, Y., Yonezu, H. and Wakahara, A. (2006). Difference of N concentrations in GaPN layers simultaneously grown on Si and GaP substrates. *Journal of Crystal Growth*, 295(1), 12-15.
46. Kunert, B., Trushelm, D., VoBebürger, V., Volz, K. and Stolz, W. (2008). Annealing experiments of the GaP based dilute nitride Ga(NAsP). *Physica Status Solidi (a)*, 205(1), 114-119.
47. Sobolev, M. S., Lazerenko, A. A., Nikitina, E. V., Pirogov, E. V., Gudovskikh, A. S. and Egorov, A. Y. (2015). MBE growth of GaP on a Si substrate. *Semiconductors*, 49(4), 559-562.
48. Benkabou, F., Becker, J. P., Certier, M. and Aourag, H. (1998). Calculation of electronic and optical properties of zinc blende  $\text{GaP}_{1-x}\text{N}_x$ . *Superlattices and Microstructures*, 23(2), 453-465.
49. Çetin, S. Ş. (2010). *GaAsP/GaAs ve InGaN/GaN p-n Eklem Yapılarının Optik ve Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 48-83.
50. Peternai, L., Jakabovic, J. and Michalka, M. (2003, 11-13 June). *Ohmic contacts to n- and p- type GaP*. 9 th. International Workshop on Applied of Condensed Matter, Mala Lucivna, Slovak Republic.
51. Tanno, T., Suto, K., Oyama, Y. and Nishizawa, J. (2003). Increase of GaP green LED efficiency with pre-annealing of the substrate. *Material Science in Semiconductor Processing*, 6(5-6), 433-435.
52. Chand, S. and Kumar, J. (1996). Evidence for the double distribution of barrier heights in  $\text{Pd}_2\text{Si}/\text{n-Si}$  Schottky diodes from I-V-T measurements. *Semiconductor Science and Technology*, 11(8), 1203-1208.
53. Tataroğlu, A. and Pür, F. Z. (2013). The Richardson constant and barrier inhomogeneity at  $\text{Au}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{n-Si}$  (MIS) Schottky diodes. *Physica Scripta*, 88(1), 1-5.
54. Das, S., Chaudhuri, S. K. and Mandal, K. C. (2016). Deep level studies in high-resistive Gallium Phosphide single crystal. *Solid State Science and Technology*, 5(4), 3059-3063.

55. Hatakenaka, S., Nakanishi, Y., Wakahara, A., Furukawa, Y. and Okada, H. (2008). Doping control and evaluation of pn-junction LED in GaPN grown by OMVPE. *Journal of Crystal Growth*, 310(23), 5147-5150.



## ÖZGEÇMİŞ



### Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : SERTEL, Tunç  
 Uyuğu : T.C.  
 Doğum Tarihi ve Yeri : 15.06.1990, Bandırma/BALIKESİR  
 Medeni Hali : Bekar  
 Telefon : 0 (536) 331 08 21  
 E-Posta : tunc.sertel@gazi.edu.tr

### Eğitim

| Derece        | Okul/Program                           | Mezuniyet tarihi |
|---------------|----------------------------------------|------------------|
| Yüksek Lisans | Gazi Üniversitesi/Fizik A.B.D.         | Devam Ediyor     |
| Lisans        | Ankara Üniversitesi/Fizik Mühendisliği | 2013             |
| Lise          | Bandırma Kemal Pireci Lisesi           | 2007             |

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

#### Ulusal seminerlerde sunulmuş bildiriler

1. Sertel, T., Kurtuluş G., Boyalı, E., Asar, T., Öztürk, M. K., Çetin, S. Ş. ve Özçelik, S. (2015, 25 Aralık). *Seyreltik Azotlu GaP<sub>1-x</sub>N<sub>x</sub> ve GaP<sub>1-x-y</sub>As<sub>y</sub>N<sub>x</sub> Yarıiletken Yapılarının MBE Tekniği ile Büyütülmesi ve Karakterizasyonu*. 21. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, P58, Ankara.
2. Çetin, S. Ş., Sertel, T., Asar, T. and Özçelik, S. (2016, 21-23 Nisan). *GaP/Si Yapılarının MBE Tekniği ile Büyütülmesi ve Karakterizasyonları*. V. Adım Fizik Günleri, Eskişehir.
3. Asar, T., Sertel, T., Korkmaz, B., Özen, Y., Efker, H. İ., Baran, V., Çat, Y., Kurtuluş, G. and Özçelik, S. (2014, 26 Aralık). *Germanyum Alttaş Üretimi: İlk Çalışmalar*. 20. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, P95, Ankara.
4. Özen, Y., Akın, N., Sertel, T., Korkmaz, B., Çetin, S. Ş., Asar, T., Kınacı, B. and Özçelik, S. (2014, 26 Aralık). *AlGaAs Tünel Diyot Entegrasyonlu GaInP/GaAs Güneş Hücre Yapısının Performansı Üzerine Çalışma*. 20. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, P37, Ankara.

5. Efkere, H. İ., Asar, T., Başköse, Ü. C., Korkmaz, B., Sertel, T., Çetin, S. Ş. and Özçelik, S. (2014, 26 Aralık). *SnO<sub>2</sub> Yansıma Önleyici Kaplamanın InGaAs/GaAs Süperörgü Yapılarının Optik ve Elektriksel Özelliklerine Etkisi*. 20. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, P96, Ankara.

## **Hobiler**

Sinema, Futbol, Yüzme



*GAZİ GELECEKTİR..*