TÜBİTAK

Seyreltik Azotlu Yapıların Epitaksiyel Büyütme Mekanizmaları ve LED Aygıt Fabrikasyonu

Program Kodu: 1001

Proje No: 114F224

Proje Yürütücüsü:
Doç. Dr. Saime Şebnem ÇETİN

Araştırmacılar:
Doç. Dr. Adem TATAROĞLU
Doç. Dr. Mustafa Kemal ÖZTÜRK

Danışman:
Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

Bursiyerler:
Tunç SERTEL
Meltem DÖNMEZ
Veysel BARAN
Abdullah KARACA
Emine BOYALI

EKİM 2017
ANKARA

ÖNSÖZ

Yarıiletken yapıların epitaksiyel olarak büyütülmesi ve karakterizasyonu çalışmaları, bu yapılardan elektro-optik aygıtların fabrikasyonu için temel gereklerdendir. Bilim ve teknoloji stratejileri değerlendirildiğinde, yarıiletken teknolojisi alanı ülkemiz için öncelikli araştırma-geliştirme alanları içerisinde yer aldığı görülmektedir. Özgün ar-ge projelerinin TÜBİTAK tarafından desteklenmesi, ülkemizde önemli teknolojilerin gelişimine katkılar sağlamaktadır. Bu destekler sayesinde Türk araştırmacıları literatüre daha fazla katkılar sağlayabilmekte, sektör için güncel ve katma değer oluşturabilecek model aygıtlar geliştirebilmektedir.

III-V grubu yarıiletkenlerin üretimi, geliştirilmesi, karakterizasyonları ve aygıt uygulamalarının yapılması için uygun altyapıya sahip olan Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi (Gazi-FOTONİK) bünyesinde yürütülen 114F224 nolu "Seyreltik Azotlu Yapıların Epitaksiyel Büyütme Mekanizmaları ve LED Aygıt Fabrikasyonu" başlıklı bu projenin desteklenmesinin, ilgili teknolojinin kazanımı ve temel-uygulamalı bilimsel bilgi birikimimizin artırılması, bu kapsamda yetkin araştırmacıların yetiştirilmesine katkılar sağladığı kanaatindeyiz. Yürütülen bu projede, Türkiye'de ilk olarak, seyreltik azotlu III-V grubu iki-renkli LED yapıları epitaksiyel olarak büyütülmüş, karakterize edilmiş ve bu yapılardan LED aygıtları fabrikasyonu yapılmıştır. Geliştirilen LED'lerin akım-gerilim ölçümleri sonucunda diyot parametreleri analiz edilmiş, literatürle uyumlu ve katkı sağlayabilecek bulgulara ulaşılmıştır.

Projemizin hayata geçebilmesi için sağladığı desteklerden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederiz. Projemizin yürütülmesinde gösterdikleri desteklerden dolayı Gazi Üniversitesi Rektörlüğüne, Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BAP) çalışanlarına şükranlarımızı sunarız.

Proje süresince deneyimi ve bilgilerinden faydalandığımız Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi kurucu Müdürü ve aynı zamanda proje danışmanımız olan Sayın Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e teşekkür ederiz.

Proje süresince özverili desteklerinden dolayı araştırmacı arkadaşlarımız Uzman Dr. Tarık ASAR, Uzman Dr. Yunus ÖZEN ve tüm Gazi-FOTONİK çalışanlarına teşekkür ederiz.

Doç. Dr. Saime Şebnem ÇETİN
Proje Yürütücüsü

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ii
İÇİNDEKİLER iii
TABLOLARIN LİSTESİ vi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ vi
ÖZET xii
ABSTRACT xiii
1. GİRİŞ 1
2. LİTERATÜR ÖZETİ 3
2.1. Yarıiletken p-n Eklem Yapılar 3
2.2. Işık Yayan Diyotlar (LED) 5
2.3. Seyreltik Azotlu Yarıiletkenler 6
2.3.1. Bant Zıt-geçiş (Band Anticrossing, BAC) modeli 10
2.4. Si Yarıiletken Elementinin Özellikleri 11
2.5. GaP Yarıiletken Bileşiğinin Özellikleri 11
2.6. Seyreltik Azotlu GaPN Yarıiletken Alaşımı 12
2.7. Seyreltik Azotlu GaAsPN Yarıiletken Alaşımı 13
3. GEREÇ ve YÖNTEM 15
3.1. Malzeme Üretimi 15
3.1.1. Moleküler Demet Epitaksi Yöntemi 15
3.2. Yapıların Karakterizasyonları 18
3.2.1. Yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı (HRXRD) 18
3.2.2. Hall Etkisi Sistemi 21
3.2.3. Spektroskopik Elipsometre (SE) 22
3.2.4. Fotolüminesans (PL) 24
3.2.5. İkincil İyon Kütle Spektrometresi (SIMS) 26
3.2.6. Atomik Kuvvet Mikroskopu (AFM) Ölçümleri 27
3.2.7. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Spektrometre Sistemi 28
3.3. LED Fabrikasyonu 29
3.3.1. Maske Hizalama Sistemi 29
3.3.2. Vakum-Buharlaştırma (Evaporasyon) Sistemi 29
3.3.3. Püskürtme (Sputtering) sistemi 30
3.3.4. Hızlı Isıl Tavlama Sistemi (RTA) 31

Sayfa

3.3.5. Profilometre Sistemi 31
3.4. Aygıt Karakterizasyonu 32
3.4.1. Aygıt Parametre Analizörü 32
3.4.2. LED Işıma Ölçüm Sistemi 33
4. BULGULAR ve TARTIŞMA 35
4.1. Kalibrasyon Numunelerinin Büyütülmesi ve Analizleri 35
4.1.1. Si alttaşlar üzerine kalibrasyon numunelerinin büyütülmesi ve karakterizasyonları 35
4.1.2. GaP alttaşlar üzerine kalibrasyon numunelerinin büyütülmesi ve karakterizasyonları 50
4.2. Seyreltik Azotlu Tek-Renkli GaAsPN LED Yapılarının Büyütülmesi ve Analizleri 58
4.2.1. Seyreltik azotlu tek-renkli GaAsPN LED yapılarının Si alttaşlar üzerine büyütülmesi ve karakterizasyonları 59
4.2.2. Seyreltik azotlu tek-renkli GaAsPN LED yapılarının GaP alttaşlar üzerine büyütülmesi ve karakterizasyonları 62
4.3. Seyreltik Azotlu Kuantum Kuyulu GaAsPN/GaPN LED Yapılarının Büyütülmesi ve Analizleri 66
4.3.1. Seyreltik azotlu kuantum kuyulu GaAsPN/GaPN LED yapılarının Si alttaşlar üzerine büyütülmesi ve karakterizasyonları 67
4.3.2. Seyreltik azotlu kuantum kuyulu GaAsPN/GaPN LED yapılarının GaP alttaşlar üzerine büyütülmesi ve karakterizasyonları 70
4.4. Seyreltik Azotlu İki-Renkli GaAsPN LED Yapılarının Büyütülmesi ve Analizleri 74
4.4.1. Seyreltik azotlu iki-renkli GaAsPN LED yapılarının Si alttaşlar üzerine büyütülmesi ve karakterizasyonları 74
4.4.2. Seyreltik azotlu iki-renkli GaAsPN LED yapılarının GaP alttaşlar üzerine büyütülmesi ve karakterizasyonları 78
4.5. LED Yapılarının Fabrikasyonu 82
4.5.1. GS295 ve GS298 Numunelerinin Fabrikasyonu 82
4.5.2. GS303 ve GS304 Numunelerinin Fabrikasyonu 86
4.5.3. GS309, GS311, GS312 ve GS313 Seyreltik Azotlu Kuantum Kuyulu GaAsPN/GaPN LED Numunelerinin Fabrikasyonu 88

Sayfa

4.5.4. GS322, GS323, GS324 ve GS325 Seyreltik Azotlu İki-renkli GaAsPN LED Numunelerinin Fabrikasyonu 91
4.6. LED Prototiplerinin Elektriksel ve Optik Karakterizasyonu 101
4.6.1. Akım-Gerilim (I-V) Ölçümleri ve Analizleri 102
4.6.2. Parlaklık-Dalgaboyu Ölçümleri ve Analizleri 109
5. SONUÇLAR 112
6. KAYNAKLAR 115

TABLO LİSTESİ

Tablo		Sayfa
Tablo 2.1.	IIIA ve VA grubu elementlerinin bazı fiziksel özellikleri	8
Tablo 2.2.	Silisyumun oda sıcaklığındaki bazı özellikleri	11
Tablo 2.3.	GaP'ın oda sıcaklığındaki bazı özellikleri	12
Tablo 4.1.	Kalibrasyon numunelerinin Hall ölçüm sonuçları	38
Tablo 4.2.	Si alttaşlar üzerine büyütülen numuneler için elde edilen FTIR spektrumundan yapıdaki bağ analizi	42
Tablo 4.3.	GaP alttaş üzerine büyütülen kalibrasyon numunelerinin Hall ölçüm sonuçları	51
Tablo 4.4.	GaP alttaşlar üzerine büyütülen numuneler için elde edilen FTIR spektrumundan yapıdaki bağ analizi	55
Tablo 4.5.	BAC Modeli ve PL spektrumundan elde edilen yasak enerji aralığı değerleri	66
Tablo 4.6.	HRXRD kırınım desenlerinden simülasyonlar sonucu belirlenen As, N ve P oranları	69
Tablo 4.7.	HRXRD kırınım desenlerinden simülasyonlar sonucu belirlenen As, N ve P oranları	72
Tablo 4.8.	BAC Modeli ve PL spektrumundan elde edilen yasak enerji aralığı değerleri	74
Tablo 4.9.	HRXRD kırınım desenlerinden simülasyonlar sonucu belirlenen As, N ve P oranları	76
Tablo 4.10.	HRXRD kırınım desenlerinden simülasyonlar sonucu belirlenen As, N ve P oranları	79
Tablo 4.11.	BAC Modeli ve PL spektrumundan elde edilen yasak enerji aralığı değerleri	81
Tablo 4.12.	Aşındırılmış ve aşındırılmamış GS295 ve GS298 numunelerinin doğrultma faktörleri	103
Tablo 4.13.	AuNiGe ile kontakları oluşturulmuş GS295 ve GS298 numunelerinin doğrultma faktörleri	104
Tablo 4.14.	GS303 ve GS304 numunelerinin doğrultma faktörleri	105
Tablo 4.15.	Hesaplanan elektriksel parametreler ve doğrultma faktörleri	107
Tablo 4.16.	Diyotların hesaplanan elektriksel parametreleri	109

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Eklem oluşumunda yük taşıyıcılarının hareketi ve enerji-bant diyagramı 4
Şekil 2.2. Doğru beslemde p-n eklem 4
Şekil 2.3. (a) Herhangi bir foton yok iken, elektron-deşik yeniden birleşmesinin eş-fazlı olmayan foton üretimi. (b) Fotonların varlığında, elektron-deşik yeniden birleşmesinin eş-fazlı olarak foton üretimi 6
Şekil 2.4. Seyreltik azotlu GaAsN yarıiletkeninde azot oranı-bant aralığı ilişkisi 7
Şekil 2.5. Bazı seyreltik azotlu yarıiletkenlerin örgü sabiti-bant aralığı diyagramı 9
Şekil 2.6. Seyreltik azotlu GaAsN yarıiletkeninin enerji-bant yapısı 10
Şekil 2.7. GaP yarıiletkeninin kristal yapısı 12
Şekil 2.8. GaPN yarıiletken alaşımının kristal yapısı 13
Şekil 2.9. Seyreltik azotlu GaPN alaşımında azot oranı-bant aralığı ilişkisi 13
Şekil 2.10. GaAsPN yarıiletken alaşımının kristal yapısı 14
Şekil 3.1. MBE işleminin şematik diyagramı 16
Şekil 3.2. Gazi-FOTONİK'de bulunan V80H model MBE sistemi 16
Şekil 3.3. VG-Semicon V80H-MBE Sistemi 17
Şekil 3.4. Kristal düzlemlerinden X-ışınlarının saçılması 18
Şekil 3.5. InGaAs/GaAs MQW yapısı (004 düzlemi) için XRD deseni 19
Şekil 3.6. Yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınım düzeneği 20
Şekil 3.7. Bruker D8 Discover cihazının genel görünümü 20
Şekil 3.8. Manyetik alan altında elektronların hareketi 21
Şekil 3.9. Lake Shore 7700 serisi Hall etkisi ölçüm sistemi 22
Şekil 3.10. Elipsometrenin ölçüm prensibi 23
Şekil 3.11. Spektroskopik elipsometre cihazı 24
Şekil 3.12. (a-c) Işımalı geçiş türleri: (a) banttan banda (b) verici seviyesinden valans bandına (c) iletkenlik bandından alıcı bandına, (d) bir orta seviye yoluyla ışımasız geçiş 25
Şekil 3.13. Fotolüminesans (PL) ölçümü için tipik deneysel düzenek 26
Şekil 3.14. Jobin Yuvon Florog-550 PL ölçüm sistemi 26
Şekil 3.15. Hiden Analitic SIMS sistemi 27
Şekil 3.16. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) 28
Şekil 3.17. Vertex 80 FTIR spektroskopi cihazı 28
Şekil 3.18. Karl Süss MJB4 Maske hizalama sistemi 29
Şekil 3.19. BesTec vakum-buharlaştırma (evaporasyon) sistemi 30

Sayfa

Şekil 3.20. BesTec püskürtme (sputtering) sistemi 30
Şekil 3.21. Hızlı Isıl Tavlama (RTA) Sistemi 31
Şekil 3.22. Veeco Dektak-150 Profilometre Sistemi 32
Şekil 3.23. Keithley 4200-SCS aygıt parametre analizörü 33
Şekil 3.24. (a) Toplama küresi (b) LED ışınım ölçümü için tipik deneysel düzenek 34
Şekil 4.1. Si alttaş üzerine büyütülen kalibrasyon numunelerinin şematik gösterimi 36
Şekil 4.2. Si alttaş üzerine büyütülen kalibrasyon numunelerinin büyütme diyagramları 38
Şekil 4.3. Si alttaş üzerine büyütülen numunelerin HRXRD kırınım desenleri 39
Şekil 4.4. Si alttaş üzerinde büyütülen kalibrasyon numunelerinin SIMS derinlik profilleri 40
Şekil 4.5. GS291 ve GS294 numunelerinin X-TEM görüntüleri 41
Şekil 4.6. GS289, GS291 ve GS299 numunelerinin soğurma (A) spektrumları 41
Şekil 4.7. GS292, GS293 ve GS294 numunelerinin soğurma (A) spektrumları 42
Şekil 4.8. Si alttaş üzerine büyütülen kalibrasyon numunelerinin 3 μm x 3 μm AFM görüntüleri 43
Şekil 4.9. Si alttaş üzerine büyütülen GS289, GS291, GS292, GS293 ve GS294 numunelerinin PL spektrumları 43
Şekil 4.10. GS289, GS291, GS299 numunelerinin ve GS292, GS293 ve GS294 numunelerinin Ψ (sırasıyla, a ve c) ve Δ (sırasıyla b ve d) elipsometrik parametrelerinin foton enerjisine göre değişimleri. (e) GS289 ve (f) GS292 numuneleri için modellemenin şematik gösterimi 44
Şekil 4.11. (a) GS289 ve (b) GS292 numunelerinin Elipsometrik modelleme sonuçları, (c) GS289 ve (d) GS292 numunelerinin sönüm sabitlerinin (k) foton enerjisine göre değişimleri (e) GS289 ve (f) GS292 numunelerinin kırılma indislerinin (n) foton enerjisine göre değişimleri 45
Şekil 4.12. GS300 ve GS301 numunelerinin büyütülmesinin şematik gösterimleri 46
Şekil 4.13. (a) GS300 ve (b) GS301 numunelerinin büyüme diyagramları 46
Şekil 4.14. GS300 ve GS301 numunelerinin HRXRD kırınım desenleri 47
Şekil 4.15. GS300 ve GS301 numunelerinin 3 μm × 3 μm AFM görüntüleri 48
Şekil 4.16. GS300 ve GS301 numunelerinin PL spektrumları 48

Sayfa

Şekil 4.17. GS300 ve GS301 numunelerinin Ψ ve Δ elipsometrik parametrelerinin foton enerjisine göre değişimleri 48

Şekil 4.18. (a) GS300 ve (b) GS301 numunelerinin Elipsometrik modelleme sonuçları (c) GS300 ve (d) GS301 numunelerinin sönüm sabitlerinin (k) foton enerjisine göre değişimleri (e) GS300 ve (f) GS301 numunelerinin kırılma indislerinin (n) foton enerjisine göre değişimleri..... 49

Şekil 4.19. GaP alttaş üzerine büyütülen kalibrasyon numunelerinin şematik gösterimi.. 50

Şekil 4.20. GaP alttaş üzerine büyütülen kalibrasyon numunelerinin büyütme diyagramları 51

Şekil 4.21. GS295 numunesinin elektriksel özellikleri 52

Şekil 4.22. GaP alttaş üzerine büyütülen numunelerin HRXRD kırınım desenleri 53

Şekil 4.23. GS295, GS296, GS297 ve GS298 numunelerinin SIMS derinlik profilleri 54

Şekil 4.24. GS295, GS296, GS297 ve GS298 numunelerinin soğurma (A) spektrumları 55

Şekil 4.25. Büyütülen numunelerin 3 μm x 3 μm AFM görüntüleri 56

Şekil 4.26. GS295, GS296, GS297 ve GS298 numunelerinin PL spektrumları..... 56

Şekil 4.27. (a) GS295 ve GS296, (b) GS297 ve GS298 numunelerinin Ψ ve Δ elipsometrik parametrelerinin foton enerjisine göre değişimleri 57

Şekil 4.28. (a) GS295 ve (b) GS297 numunelerinin Elipsometrik modelleme sonuçları (c) GS295 ve (c) GS297 numunelerinin sönüm sabitlerinin (k) foton enerjisine göre değişimleri (e) GS295 ve (f) GS297 numunelerinin kırılma indislerinin (n) foton enerjisine göre değişimleri..... 58

Şekil 4.29. GS303 ve GS304 numunelerinin büyütülmesinin şematik gösterimleri..... 59

Şekil 4.30. GS303 numunesinin büyüme diyagramı 59

Şekil 4.31. GS303 numunesinin HRXRD kırınım deseni ve simülasyonu..... 60

Şekil 4.32. GS303 numunesinin SIMS derinlik profili 60

Şekil 4.33. GS303 numunesinin 10 μm × 10 μm AFM görüntüleri..... 61

Şekil 4.34. GS303 numunesinin PL spektrumu..... 61

Şekil 4.35. GS303 numunesinin Ψ ve Δ elipsometrik parametrelerinin enerjisine göre değişimi..... 62

Şekil 4.36. GS303 numunesinin (a) Elipsometrik modelleme sonuçları (b) sönüm sabitinin (k) foton enerjisine göre değişimi (c) kırılma indisinin (n) foton enerjisine göre değişimi……..... 62

Sayfa

Şekil 4.37. GS304 numunesinin büyüme diyagramı 63
Şekil 4.38. GS304 numunesinin HRXRD kırınım deseni ve simülasyonu..... 63
Şekil 4.39. GS304 numunesinin SIMS derinlik profili 63
Şekil 4.40. GS304 numunesinin 10 μm × 10 μm AFM görüntüsü..... 64
Şekil 4.41 GS304 numunesinin PL spektrumu..... 64
Şekil 4.42. GS304 numunesinin Ψ ve Δ elipsometrik parametrelerinin
foton enerjisine göre değişimi……. 65
Şekil 4.43. GS304 numunesinin (a) Elipsometrik modelleme sonuçları
(b) sönüm sabitinin (k) foton enerjisine göre değişimi (c) kırılma
indisinin (n) foton enerjisine göre değişimi……..... 65
Şekil 4.44. GS309 ve GS311 numunelerinin büyütülmesinin şematik gösterimleri 67
Şekil 4.45. GS309 ve GS311 numunelerinin büyütme diyagramları 67
Şekil 4.46. Kuantum kuyulu GS309 ve GS311 numunelerinin HRXRD
kırınım desenleri 68
Şekil 4.47. GS309 ve GS311 numunelerinin SIMS derinlik profili 69
Şekil 4.48. GS309 ve GS311 numunelerinin PL spektrumları 70
Şekil 4.49. GS312 ve GS313 numunelerinin büyütülmesinin şematik gösterimleri 70
Şekil 4.50. GS312 ve GS313 numunelerinin büyütme diyagramları 71
Şekil 4.51. 7 kuantum kuyulu GS312 numunesinin HRXRD kırınım deseni 71
Şekil 4.52. 3 kuantum kuyulu GS313 numunesinin HRXRD kırınım deseni 72
Şekil 4.53. GS312 ve GS313 numunelerinin SIMS derinlik profilleri 73
Şekil 4.54. GS312 ve GS313 numunelerinin PL spektrumları 73
Şekil 4.55. GS322 ve GS323 numunelerinin büyütülmesinin şematik gösterimleri 74
Şekil 4.56. GS322 ve GS323 numunelerinin büyütme diyagramları 75
Şekil 4.57. GS322 ve GS323 numunelerinin HRXRD kırınım desenleri
ve simülasyonları 76
Şekil 4.58. GS322 ve GS323 numunesinin SIMS derinlik profilleri 77
Şekil 4.59. GS322 ve GS323 numunelerinin PL spektrumları 77
Şekil 4.60. GS324 ve GS325 numunelerinin büyütülmesinin şematik gösterimleri 78
Şekil 4.61 GS324 ve GS325 numunelerinin büyütme diyagramları 78
Şekil 4.62. GS324 ve GS325 numunelerinin HRXRD kırınım desenleri
ve simülasyonları 79
Şekil 4.63. GS324 ve GS325 numunesinin SIMS derinlik profilleri..... 80
Şekil 4.64. GS324 ve GS325 numunelerinin PL spektrumları 80
Şekil 4.65. GS295 ve GS298 numunelerinin voltaj altında ışıma görüntüleri 82

Sayfa

Şekil 4.66. Fotomaske 83
Şekil 4.67. Numunenin aşındırma işleminin şematik göster 84
Şekil 4.68. Ön ve arka yüzey maskeleri 85
Şekil 4.69. AuNiGe kontakları oluşturulmuş (a) GS295 ve (b) GS298 numuneleri 86
Şekil 4.70. (a) Yuvarlak delikli maske ve (b) ön yüzey kontakları oluşturulmuş numuneler 87
Şekil 4.71. (a) Arka yüzey kontak maskesi ve (b) arka yüzey kontakları oluşturulmuş numuneler 88
Şekil 4.72. Arka Yüzey Kontak Fotomaskesi 89
Şekil 4.73. Arka Yüzey Kontakları Oluşturulmuş Numuneler 90
Şekil 4.74. Ön Yüzey Kontak Fotomaskesi 90
Şekil 4.75. Ön Yüzey Kontakları Oluşturulmuş Numuneler 91
Şekil 4.76. Arka Kontak Fotomaskesi 92
Şekil 4.77. Aynı Yüzey Üzerinde Ön ve Arka Kontakları Oluşturulmuş Numune 94
Şekil 4.78. (a) Ön ve (b) Arka Yüzey Kontakları Oluşturulmuş Numune 96
Şekil 4.79. Aynı Yüzeyde Ön, Orta ve Arka Kontakları Oluşturulmuş Numune 99
Şekil 4.80. (a) Ön, Orta ve (b) Arka Kontakları Oluşturulmuş Numune 101
Şekil 4.81. Aşındırılmış ve aşındırılmamış GS295 numunelerinin I-V grafikleri 102
Şekil 4.82. Aşındırılmış ve aşındırılmamış GS298 numunelerinin I-V grafikleri 102
Şekil 4.83. GS295 ve GS298 Numunelerinin I-V Grafikleri 103
Şekil 4.84. GS303 ve GS304 numunelerinin I-V grafikleri 104
Şekil 4.85. GS309, GS311, GS312 ve GS313 numunelerinin I-V ve ln(I)-V Grafikleri 106
Şekil 4.86. GS322 ve GS324 numunelerinin I-V ve ln(I)-V Grafikleri 108
Şekil 4.87. GS323 ve GS325 numunelerinin I-V ve ln(I)-V Grafikleri 108
Şekil 4.88. LED aygıtlardan birinin ve ölçüm sisteminin görüntüleri 110
Şekil 4.89. Numunelerin parlaklığının (irradiance) dalgaboyuna göre değişimi 110

ÖZET

Proje kapsamında, seyreltik azotlu III-V grubu GaAsPN tek-renkli, kuantum kuyulu ve iki-renkli ışık yayan diyot (LED) yapıları Moleküler Demet Epitaksi (MBE) tekniği ile Si ve GaP alttaşlar üzerine büyütüldü. Si alttaş üzerine GaP katmanının düzgün olarak büyütülmesi (110) düzlemine 4°'lik açıyla kesilmiş (100) yönelimli Si alttaş kullanımı, MEE (migration enhanced epitaxy) tekniği ve P_2 akısı altında belli zaman aralıklarında alttaş sıcaklığının adım-artımlı olarak değişimi yöntemi kullanılarak başarıldı. Büyütülen yapıların, yapısal, elektriksel ve optik özellikleri Yüksek Çözünürlüklü X-ışını Kırınımı (HRXRD), Hall Etkisi, İkincil İyon Kütle Spektrometresi (SIMS), Atomik Kuvvet Mikroskopu (AFM), Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Spektrometre**,** Fotolüminesans (PL) ve Spektroskopik Elipsometre (SE) Sistemleri kullanılarak belirlendi.

Bu yapılardan fotolitografik yöntemle LED aygıtı fabrikasyonları Maske Hizalama Sistemi, Vakum-Buharlaştırma (Evaporasyon) Sistemi, Püskürtme (Sputtering), Hızlı Isıl Tavlama Sistemi (RTA) ve Profilometre Sistemleri kullanılarak gerçekleştirildi. Üretilen LED aygıtlarının akım-gerilim (I-V) ölçümleri ile çıktı parametreleri değerlendirildi. LED karakterizasyon sistemi kullanılarak, üretilen LED'lerin parlaklığı ölçüldü. GaP ve Si alttaşlar üzerine Seyreltik azotlu III-V grubu kristal epitaksiyel büyütme süreçlerinin geliştirilmesi, bu yapıların karakterizasyonları, kuantum kuyulu, tek ve iki-renkli LED yapılarının fabrikasyon süreçlerinin geliştirilmesi ar-ge çalışmaları sonucu üretilen LED aygıt prototipleri bu projenin önemli çıktılarını oluşturmaktadır. Proje kapsamındaki LED malzemeleri tamamıyla ülkemizde yerel imkânlarla üretildi ve geliştirilen prototipler elektro-optik aygıt teknolojisi alanında malzeme ve aygıt geliştirme süreçlerinde lisansüstü öğrenciler yetiştirilmesinde katkı sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Seyreltik Azot, GaAsPN, GaPN, GaP, Si, LED, MBE

ABSTRACT

Within the scope of the project, dilute nitride group III-V GaAsPN single-color, quantum well and two-color light emitting diode (LED) structures produced were grown on Si and GaP substrates by molecular beam epitaxy (MBE) technique. The proper growth of the GaP layer on the Si substrate was achieved by using the (100) oriented Si substrate, which was cut at a 4° angle to the (110) plane, migration enhanced epitaxy (MEE) and step-graded exchange method of substrate temperature at certain time intervals under P2 flux. The structural, electrical and optical properties of the grown structures have been determined by using High Resolution X-Ray Diffraction (HRXRD), Hall Effect, Secondary Ion Mass Spectrometry (SIMS), Atomic Force Microscope (AFM), Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectrometer, Photoluminescence and Spectroscopic Ellipsometer (SE) Systems. The LED devices were fabricated by photolithographic method using Mask Alignment System, Vacuum Evaporation System, Sputtering, Rapid Thermal Annealing System (RTA) and Profilometer Systems. Output parameters were evaluated with current-voltage (I-V) measurements of the LED devices produced. Using the LED characterization system, the irradiance of the produced LEDs was measured. The development of the crystal epitaxial growth processes of the group III-V diluted nitrogen on GaP and Si substrates, the characterization of these structures, the improvement of the fabrication processes of the quantum well, single and two-color LED structures and LED device prototypes generated by R&D researches constitute important outputs of this project. The LED materials within the scope of the project have been produced with local possibilities in our country and the prototypes that have been developed have contributed to the training of graduate students in the field of material and device development in the field of electro-optic device technology.

Key Words: Dilute Nitride, GaAsPN, GaPN, GaP, Si, LED, MBE

1. GİRİŞ

Işık yayan diyotlar (LED'ler) morötesi, görünür ve kızılötesi bölgelerde ışıma yayabilen p-n eklemlerdir (Sze, 2002). p-n eklemler, yük taşıyıcıları elektronlar (n-tipi) ve deşikler olan (p-tipi) iki katmanın üst üste büyütülmeleriyle oluşan eklemli yapılardır. Bu yapılar, tabakaların epitaksiyel büyütme sürecinde uygun elementlerle katkılanmasıyla elde edilebilmektedir. Günümüz teknolojisinde ışık yayan diyotlar, epitaksiyel olarak Moleküler Demet Epitaksi (MBE) ve Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD) yöntemleri ile iyi kristal kalitesinde üretilmektedirler (Herman, 1996; Sıngh, 2003; Parker, 1985; Bauer, 1996). Bu metotlar, istenilen kalınlıkta ve düşük kusur oranı ile yarıiletken kristal oluşturulmakta öne çıkmaktadır. MBE tekniği, eklemli yapıların oluşturulmasında, katkı oranının hassas olarak kontrol edilebilmesine imkân sağlamaktadır ve RF plazma kaynağı sayesinde seyreltik azotlu yapıların büyütülmesine imkan vermektedir. III-V grubu tabanlı seyreltik azotlu (SA) yarıiletken yapılar yüksek verimli güneş hücresi, LED ve Lazer üretiminde teknolojik öneme sahiptirler (Mascarenhas, 2001).

Literatürde seyreltik azot katkılı GaP ve Si tabanlı GaAsPN tek-renkli ve kuantum kuyulu LED yapılarının örnekleri bulunmakla birlikte (Robert, 2011; Sato, 2002; Cornet, 2011; Umeno, 2009), bilgimiz dahilinde literatürde iki renkli GaAsP:N LED yapıları büyütülmesi ve aygıt fabrikasyonu çalışmalarına rastlanmamıştır. Bu kapsamda yaptığımız çalışmaların literatüre malzeme geliştirme ve fabrikasyon açılarından yeni katkılar sağlanacağı düşünülmektedir. Si alttaş üzerine GaP veya III-V grubu bileşimlerin büyütülmesinde faz kontrolü önemli bir problemdir. Bu problemin kaynağı Grup IV elementleri ile III-V grubu bileşimler arasındaki örgü simetrisindeki farklılıklardan kaynaklanmaktadır (Yu, 2004). Bu farklılık arayüzeyde anti-faz bölgelerinin oluşumuna neden olmaktadır. Bu problem, (100) yönelimli alttaşların (110) yönelimine birkaç derecelik açıyla kesilimi ile çözülebilmektedir (Grassman, 2009; Grassman, 2010). Öte yandan alttaş yüzeyine ilk önce MEE (migration enhanced epitaxy) tekniği ile alttaş yüzeyine ardışık elementel demet akılarını göndermekle gerçekleştirilebilmektedir (Thanh, 2012; Thanh, 2013). Ayrıca GaP'ın Si üzerine büyütülmesinde yüzeye belirli süre sadece P2 akısı göndererek yüzeyde çekirdekleşme tabakası oluşturulması ve böylece GaP'ın düzgün büyümesi de kullanılan diğer bir yöntemdir (Grassman, 2009). Bu proje kapsamında bu yöntemler denenmiş ve Si alttaş üzerine GaP katmanının düzgün olarak büyütülmesi şu şekilde başarılmıştır: (110) düzlemine 4°'lik açıyla kesilmiş (100) yönelimli Si alttaş üzerine MEE (migration enhanced epitaxy) tekniği ile 5x(Ga/P_2) tabakasının büyütülmesinin ardından oluşturulan tabakanın üzerine katkısız GaP katmanı 400 °C'de büyütülmesi ve sonra P_2 akısı altında dakikada 1.6 °C adım-artımlı olarak

400 °C'den 480 °C'e kadar alttaş sıcaklığı arttırılarak alttaşın 480 °C'de 40 dakika tavlanması.

Literatür değerlendirilmesi sonucunda; seyreltik azotlu tek dalga boyunda ışıma yapan LED'lerin yanında, birden fazla dalga boyunda ışıma yapabilen diyotlar üzerine yapılan çalışmalar güncelliğini koruduğu anlaşılmaktadır. Bu çalışmalar temel olarak malzeme büyütme ve fabrikasyon süreçlerinin geliştirilmesi şeklindedir. LED ürünleri günümüzde yaygın olarak ticari ürün haline gelmiş olmakla birlikte malzeme geliştirme ve fabrikasyon çalışmaları, özellikle çok renkli diyot malzemelerinin farklı metotlarla ve farklı malzeme kompozisyonunda geliştirilmesi ar-ge çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu proje ile günümüz yarıiletken malzeme ve üretim teknolojisini kullanarak, seyreltik azotlu tek-renkli, kuantum kuyulu ve iki-renkli yarıiletken ışık yayan diyot yapılarını geliştirmek ve üretmek hedefi ile yukarıda özetlenen, malzemelerin yapısal ve optik kalitelerinin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi alanında yenilikler sağlayacaktır. Proje çıktıları halen yapılmakta olan yeni malzeme geliştirme ve model LED fabrikasyon ar-ge çalışmalarına literatür ve uygulama boyutunda katkı sağlayabilecektir. Ayrıca ülkemizde ilgili teknoloji henüz yetkinliğe ulaşmamış, katkı ve gelişmeye ihtiyaç duymaktadır. Büyütülen SA'lu LED yapılarının, bilgimiz dahilinde, MBE tekniği ile ülkemizde ilk olarak büyütülmesi şu anda dünyada kullanılan yarıiletken LED teknolojisine ulaşmamıza katkı sağlamakta, yeni uygulamalara/projelere öncülük edebilmekte ve bu alanda temel bilime katkı sağlamaktadır.

Bu projede, seyreltik azotlu III-V grubu GaAsPN tek-renkli, iki-renkli ve kuantum kuyulu LED yapıları MBE tekniği ile Si ve GaP alttaşlar üzerine büyütüldü. Büyütülen yapıların karakterizasyonlarının gerçekleştirilmesinin ardından LED fabrikasyonu ve aygıt karakterizasyonları yapıldı. Bu raporun 2. Bölümünde yarıiletken p-n eklem yapıları; ışık yayan diyotlar (LED); seyreltik azotlu yarıiletkenler; Si yarıiletken elementinin özellikleri; GaP yarıiletken bileşiğinin özellikleri; seyreltik azotlu GaPN yarıiletken alaşımı ve seyreltik azotlu GaAsPN yarıiletken alaşımı ile ilgili genel bilgiler verildi. 3. Bölümde kristallerin büyütülmesi (malzeme üretilmesi), karakterizasyonları, LED fabrikasyonu ve aygıt karakterizasyonlarında kullanılan sistemler ve yöntemler tanıtıldı. 4. Bölümde kalibrasyon numunelerinin ve SA'lu LED yapılarının moleküler demet epitaksi (MBE) tekniği ile büyütülmesi ve analizleri verildi. Daha sonra, LED fabrikasyonu ve LED çıktı parametrelerinin belirlendiği aygıt karakterizasyonları sunuldu. Son bölüm olan 5. Bölümde ulaşılan sonuçlar kısaca sunuldu.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

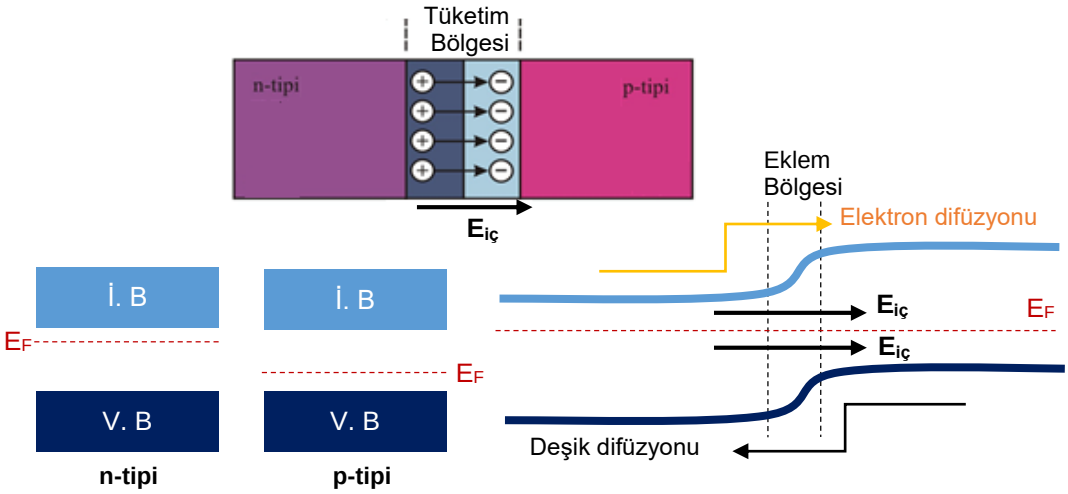
Bu bölümde, yarıiletken p-n eklem yapılar, ışık yayan diyotlar (LED) ve seyreltik azotlu yarıiletken malzemeler hakkında bilgi verildi. Ayrıca bu proje kapsamında kullanılan Si yarıiletken elementi, GaP yarıiletken bileşiği, GaPN ve GaAsPN seyreltik azotlu alaşımları tanıtıldı.

2.1 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.

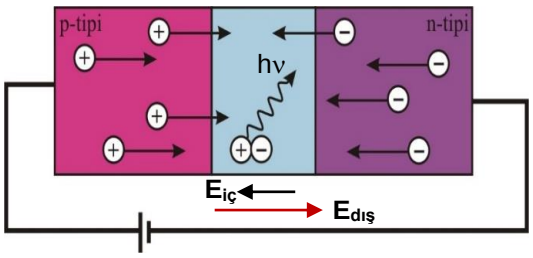
p-n eklem yapılar, epitaksiyel büyütme sürecinde birbiri üzerine büyütülen tabakaların uygun elementlerle p-tipi ve n-tipi olarak katkılanmasıyla elde edilebilmektedir. Bunun dışında p-n eklemler, difüzyon, iyon ekimi, termal tavlama ve oksidasyon gibi yöntemlerle de oluşturulabilmektedir (Streetman, 2006; Sze, 2006).

p-tipi ve n-tipi yarıiletkenler bir araya getirildiğinde, oluşan eklemin 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 taraftaki elektronlar ise p-tipi tarafına doğru Fermi seviyeleri eşitlenene kadar nüfuz eder. p-tipi tarafına geçen elektronlar deşiklerle yeniden birleşir. Deşikler p-tipi taraftan ayrıldıkça, eklem yakınındaki iyonize olmuş alıcı iyonlar, elektronlar n-tipi taraftan ayrıldıkça, eklem yakınındaki iyonize olmuş verici iyonlar dengelenmemiş olarak kalır. Dolayısıyla, eklemin 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 (Boylestad, 1998; Sze, 2006) (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Eklem oluşumunda yük taşıyıcılarının hareketi ve enerji-bant diyagramı (Streetman, 2006)

Eklem bölgesindeki elektrik alan, bu bölgedeki elektronları n-tipi tarafına doğru, deşikleri 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 deşiklerin 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 deşik difüzyonu ve n-tipi tarafından p-tipi tarafına doğru elektron difüzyonu oluşur, deşikler n-tarafına doğru itelenirken elektronlar p-tarafına doğru itelenir. Eklem yakınlarında karşılaşan elektronlar ve deşikler yeniden birleşir (Şekil 2.2) (Streetman, 2006; Sze, 2006).



Şekil 2.2. Doğru beslemde p-n eklem (Streetman, 2006)

Yeniden birleşme sonucunda, eklemden foton salınır. Bu mekanizma, ışık yayan diyotların (LED) ve lazer diyotların (LD) temelini oluşturur. Benzer şekilde ekleme 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.

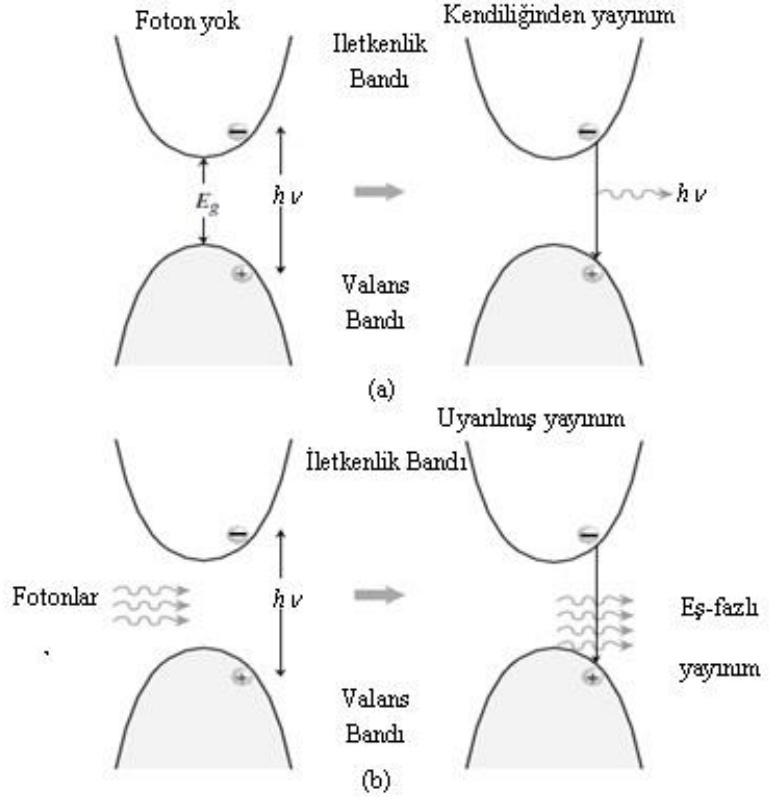
2.2 Işık Yayan Diyotlar (LED)

Işık yayan diyotlar (LED'ler) morötesi, görünür veya kızılötesi bölgelerde kendiliğinden ışıma yayabilen p-n eklemlerdir (Sze, 2006). p-n eklemler tabakaların epitaksiyel büyütme sürecinde uygun elementlerle katkılanmasıyla elde edilebilmektedir. Günümüz teknolojisinde ışık yayan diyotlar, epitaksiyel olarak MBE ve MOCVD gibi ileri düzey kristal büyütme yöntemleri ile yüksek kristal kalitesinde üretilmektedir (Herman, 1996; Singh, 2003; Parker, 1985; Bauer, 1996). Bu metotlar yardımıyla, istenilen kalınlığa, istenilen katkı yoğunluğuna ve düşük kusur orana sahip yapılar oluşturulmaktadır.

Eklem bölgesinde meydana gelen ve foton salımı ile sonuçlanan yeniden birleşme mekanizması, LED'lerin ve lazer diyotların (LD) temelini oluşturur. LED'ler ve LD'ler görüntüleme ve iletişim teknolojisinde kullanılan çok önemli opto-elektronik cihazlardır. LD uyarılmış emisyonu temel alarak çalışırken, LED'ler kendiliğinden emisyonu temel alır. Uyarılmış emisyon, numunedeki mevcut foton sayısına bağlıdır. Kendiliğinden emisyonda elektron-deşik yeniden birleşmesinden kaynaklanan enerjiye sahip fotonlar eş-fazlı değildir, yani her biri rastgele bir faza sahiptir. Bununla birlikte, uyarılmış emisyondaki fotonların enerji fazı daha önce var olanlarla aynıdır. Kendiliğinden ve uyarılmış emisyon arasındaki bu fark, Şekil 2.3 'de gösterildiği gibi, lazer diyotlardaki eş-fazlı ışık emisyonundan kaynaklanmaktadır (Singh, 2003).

Seyreltik azotlu yarıiletken aktif malzemelere dayalı kırmızı, sarı ve yeşil LED'ler yüksek güç ve düşük sıcaklık duyarlılığı avantajlarına sahiptir. Genel aydınlatmada mavi ve beyaz renkli LED'ler tercih edilirken büyük renkli ekranlar, trafik ışıkları ve dekoratif aydınlatmada kırmızı, amber ve sarı ışık yayıcılar önem kazanmaktadır. Yüksek kalitede görüntü elde etmede kararlı kırmızı ışığın önemi nedeniyle geniş alan görüntüleyici ekranlarda kullanılan, yüksek parlaklığa sahip LED'lerin sıcaklık hassasiyetinin düşük olması gerekmektedir. Kırmızı ışık yayıcı olarak tercih edilen AlInGaP yarıiletken malzemesi yerine seyreltik azotlu GaP yapısının kullanımı hem parlaklık hem de sıcaklık duyarlılığı açısından avantaj sağlamaktadır. Bilindiği gibi AlInGaP temelli ışık yayıcılar GaAs alttaş üzerine büyütülmektedir. Bu yapılarda ışık verimini

artırmak amacıyla, alttaş üzerine büyütülen epi-katman, şeffaf GaP veya ayna yüzeyli taşıyıcı üzerine transfer edilmektedir (Odnoblyudov, 2006).



Şekil 2.3. (a) Herhangi bir foton yok iken, elektron-deşik yeniden birleşmesinin eş-fazlı olmayan foton üretimi. (b) Fotonların varlığında, elektron-deşik yeniden birleşmesinin eş-fazlı olarak foton üretimi (Singh, 2003)

Bu durum, iş ve malzeme maliyetini artırmaktadır. Seyreltik azotlu yapıların GaP üzerine büyütülebilmeleri, epi-tabaka transferini ve bağlama prosesini ortadan kaldırmaktadır. Bu özellikleri ile seyreltik azotlu LED yapıları, düşük üretim maliyeti, yüksek renk sıcaklık kararlılığı ve yüksek akım yoğunluklarında parlak ışıma şeklinde tarif edilebilen üç önemli avantaja sahiptir.

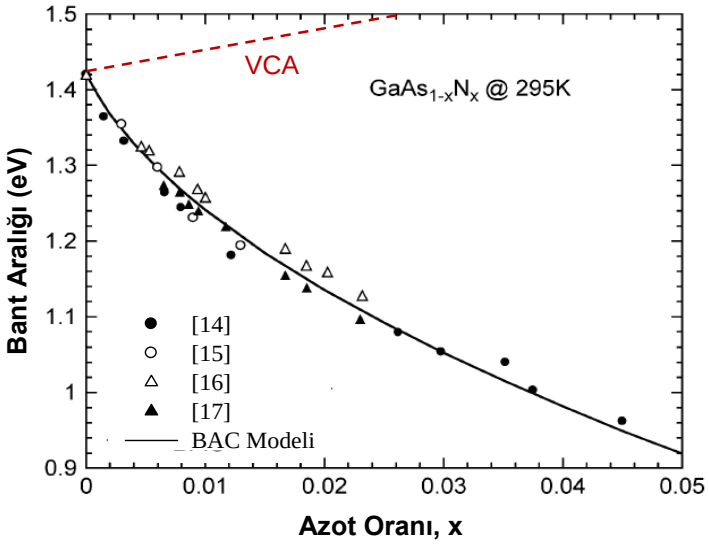
2.3 Seyreltik Azotlu Yarıiletkenler

Seyreltik azotlu yarıiletkenler, III-V grubu yarıiletkenlere alaşım oranı %5'den az olacak şekilde azot (N) atomu eklenmesiyle elde edilen yarıiletkenlerdir (Harris, 2007). 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 bilinen örnekleri, $GaAs_{1-x}N_x$,

$GaP_{1-x}N_x$, $GaP_{1-x-y}As_yN_x$, $In_xGa_{1-x}As_{1-y}N_y$ ve $Al_xGa_{1-x}As_{1-y}N_y$ alaşımlarıdır. Burada x ve y alaşım oranlarını göstermektedir (Erol, 2008).

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 opto-elektronik 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 opto-elektronik entegre devreler (OEIC) ile Si tabanlı teknolojiyi bir araya getirerek, Si tabanlı opto-elektronik entegre devrelere imkan sağlamaktadır (Erol, 2008; Furukawa, 2002).

Seyreltik azotlu yarıiletkenlerin ilk örnekleri, $GaAs_{1-x}N_x$ ve $In_xGa_{1-x}As_{1-y}N_y$ alaşımlarıdır. Bu alaşımların büyütülmesindeki amaç, bant aralığı GaAs (1.42 eV) ile GaN (3.4 eV) arasında değişen yarıiletkenler elde etmekti. Ancak ilk deneysel bulgularda, III-V grubu yarıiletken örgü içerisine katılan azotun, bant aralığını beklendiği gibi arttırmak yerine azalttığı gözlendi (Erol, 2008). Bu azalma azotun alaşım oranı ile yakından ilişkilidir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Seyreltik azotlu GaAsN yarıiletkeninde azot oranı-bant aralığı ilişkisi (Bhat, 1998; Malikova, 1998; Keyes, 1999; Uesugi, 1999)

Birçok III-V grubu yarıiletkenin bant aralığı, Sanal Kristal Yaklaşıklığı (VCA) ile Eş. 2.1'de verilen Vegard yasası denklemi kullanılarak hesaplanabilir (Wang, 2011). 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 (Vurgaftman, 2001). Bu durum, azot ile diğer IIIA ve VA grubu elementleri arasındaki fiziksel parametrelerin farkından kaynaklanmaktadır. IIIA ve VA grubu elementlerinin bazı fiziksel özellikleri Tablo 2.1 '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 (Erol, 2008).

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

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

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 (Erol, 2008).

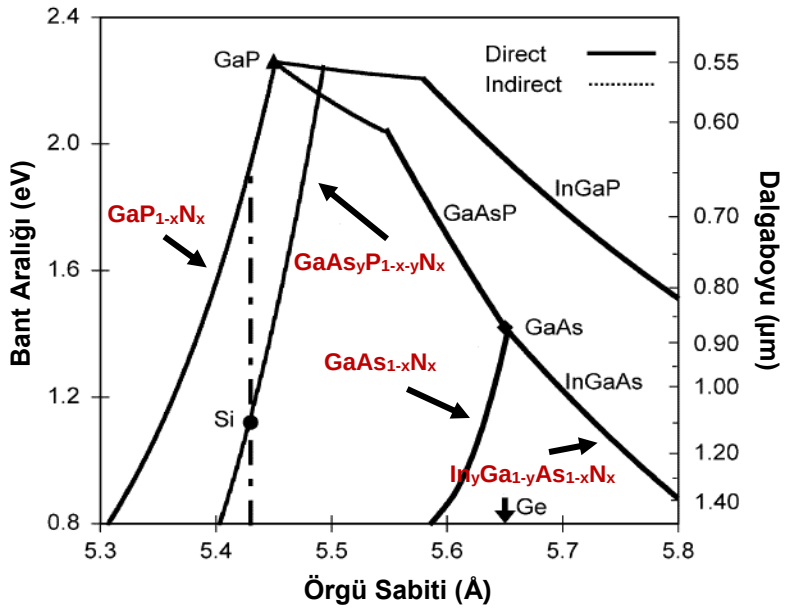
Tablo 2.1. IIIA ve VA grubu elementlerinin bazı fiziksel özellikleri

Element	Grup	Atom Numarası	Elektronegatiflik (p.b.)	Atom Yarıçapı (Å)
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, ışıma ve soğurma dalgaboyunda artışa neden olmaktadır. Bu durum seyreltik azotlu yarıiletkenlerin uzun dalgaboyu bölgesinde çalışabilen aygıtlarda kullanılabilmesini sağlamaktadır.

Ancak azotun grup V atomlarıyla yer değiştirmesi sonucunda oluşan özellikle nokta kusurları bant aralığında derin seviyelerin oluşmasına neden olabilmektedir ve bu ise alaşımların optik kalitesini azaltmada ana rol oynamaktadır (Dagnelund, 2013). Bu yapılarda oluşan Ga nokta kusurları opto-elektronik aygıt performansını etkileyen önemli parametrelerden biridir ve bu problem aşılması beklenen problemler içerisinde yer almaktadır.

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 (Henini, 2005). Bu azalma, yapıdaki azotun alaşım oranıyla ilişkilidir. Bazı seyreltik azotlu yarıiletkenlerin örgü sabiti-bant aralığı diyagramı Şekil 2.5 'de verildi.



Şekil 2.5. Bazı seyreltik azotlu yarıiletkenlerin örgü sabiti-bant aralığı diyagramı(Henini, 2005)

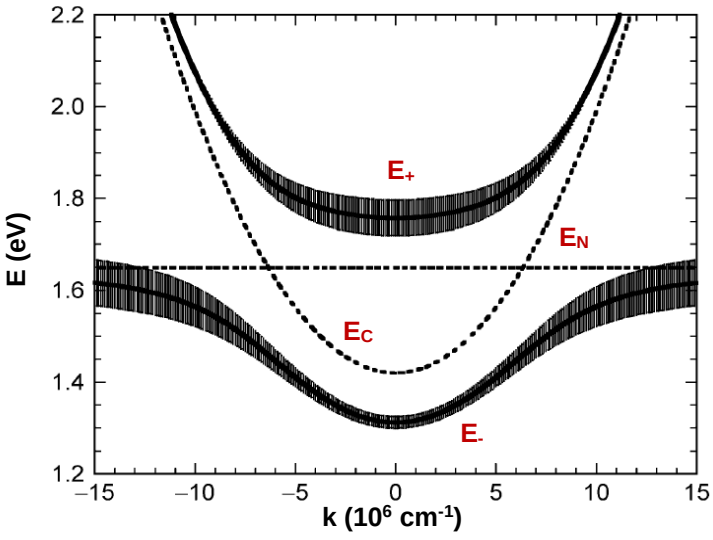
Azotun yapısal özelliklere diğer etkisi, kristal örgüde meydana getirdiği kusurlardır. Azot, bir araya gelerek alaşım oluşturduğu diğer IIIA ve VA grubu atomlarına göre daha küçük yarıçapa sahiptir. Yapı içerisinde farklı boyutlara ve farklı termal özelliklere sahip atomlar farklı kinetik enerjilere 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 (Henini, 2005).

2.3.1 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 (Wu, 2002).

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 (Shan, 2004). Lokalize azot seviyesi ile iletkenlik bandı arasındaki güçlü etkileşim, iletkenlik bandının Şekil 2.6 'da 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 (Ünsal, 2014).



Şekil 2.6. Seyreltik azotlu GaAsN yarıiletkeninin enerji-bant yapısı (Erol, 2008)

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 (Wu, 2002).

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

$$V_{MN} = -C_{MN}\sqrt{x} \tag{2.3}$$

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

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 (Wu, 2002).

2.4 Si Yarıiletken Elementinin Özellikleri

Silisyum, periyodik tablonun IV. sütununda bulunan yarıiletken elementtir. Si kristali elmas yapıdadır ve oda sıcaklığında bazı özellikleri Tablo 2.2'de verilmiştir.

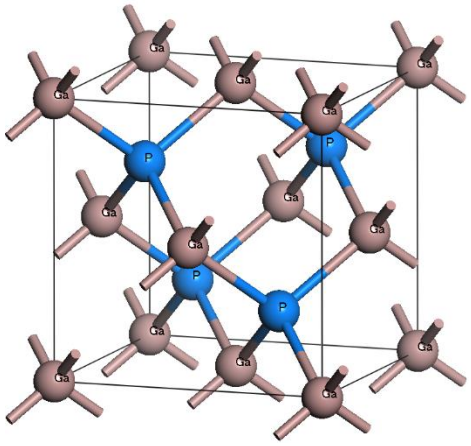
Tablo 2.2. Silisyumun oda sıcaklığındaki bazı özellikleri

Özellik	Parametre
Kristal yapısı	Elmas
Yasak enerji aralığı (eV)	1.12
Örgü sabiti, *a(Å)*	5.431
Termal genleşme katsayısı α (10^{-6} C^{-1})	2.6
Erime noktası (°C)	1412
Isıl iletkenliği κ (W/cm C)	1.3
Kırılma indisi, *n*	3.42

2.5 GaP Yarıiletken Bileşiğinin Özellikleri

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 2.7). GaP'ın oda sıcaklığındaki bazı özellikleri Tablo 2.3'de verildi.



Şekil 2.7. GaP yarıiletkeninin kristal yapısı

Tablo 2.3. GaP'ın oda sıcaklığındaki bazı özellikleri (Levinshtein, 1996)

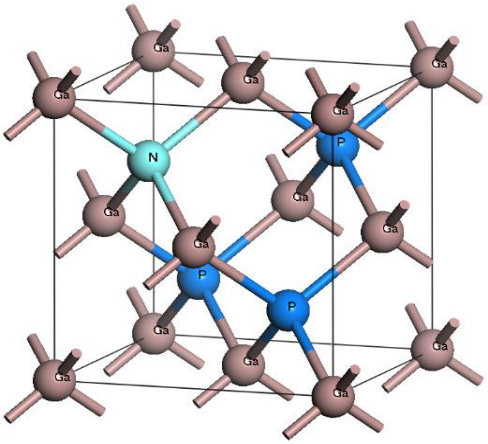
Özellik	**Parametre**
Kristal yapısı	Çinko sülfür
Yasak enerji aralığı (eV)	2.78 (direkt), 2.26 (indirekt)
Örgü sabiti, *a(Å)*	5.45
Termal genleşme katsayısı α (10^{-6} K^{-1})	4.65
Erime noktası (°C)	1477
Isıl iletkenliği κ (W/cm K)	1.10
Kırılma indisi, *n*	3.02

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 2.8).

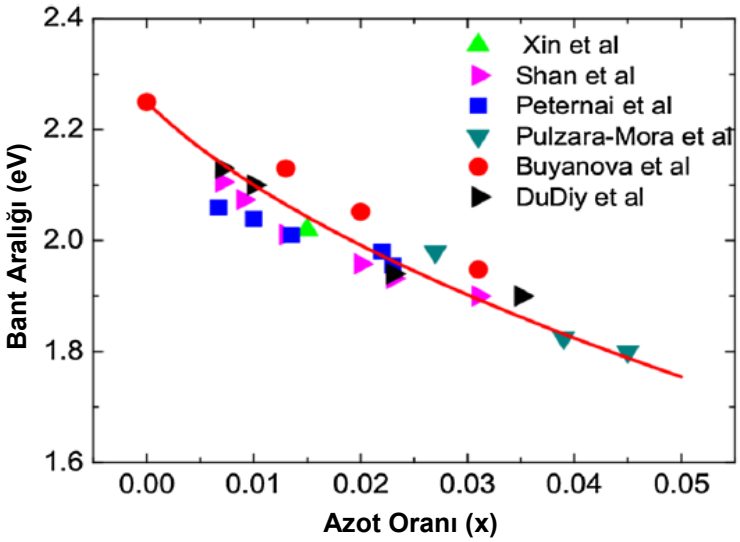
Yapıya eklenen azot, diğer seyreltik azotlu yarıiletkenlerde olduğu gibi GaP'ın yasak enerji aralığında ve örgü sabitinde azalmaya neden olur. GaPN alaşımının azot oranına göre yasak enerji aralığı değişimi Şekil 2.9 'da verildi. Ayrıca indirekt yasak enerji aralığına sahip olan GaP

yarıiletkeni, azot alaşım oranı x>0,005 iken direkt yasak enerji aralığı özelliği göstermektedir (Vurgaftman, 2003).



Şekil 2.8. GaPN yarıiletken alaşımının kristal yapısı

GaPN alaşımının bant enerjileri (E_+ ve E_-), BAC modeli kullanılarak Eş. 2.4 ile hesaplanabilir. Burada GaPN alaşımına ait parametreler $C_{MN} = 3.05$ ve $E_N = 2.18$ eV olarak verilir (Vurgaftman, 2003).



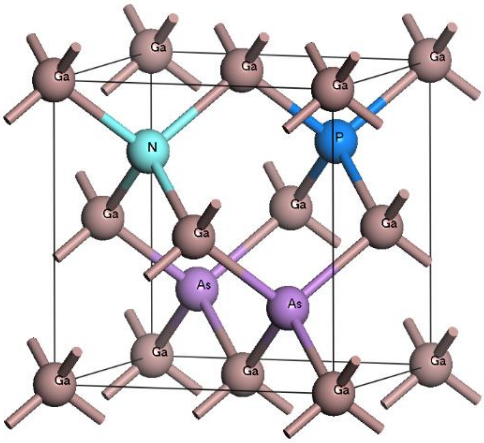
Şekil 2.9. Seyreltik azotlu GaPN alaşımında azot oranı-bant aralığı ilişkisi (Zhao, 2014)

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 (Henini, 2005). 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 2.10).

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 (Egorov, 2011).



Şekil 2.10. GaAsPN yarıiletken alaşımının kristal yapısı

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

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

denklemi ile hesaplanır. Burada, b_{GaAsP} = -0.21 eV, GaAsN için parametreler C_{MN} =2.7 ve E_N =1.65 eV olarak verilir (Egorov, 2011).

3. GEREÇ ve YÖNTEM

Bu bölümde, proje kapsamında belirtilen kalibrasyon numunelerinin, kuantum kuyulu LED, tek-renkli ve iki-renkli p-n eklem LED yapılarının geliştirilebilmesi amacıyla seyreltik azotlu yarıiletken katmanların epitaksiyel olarak büyütülmesi, yapısal, elektriksel ve optik özelliklerinin analizi ve fabrikasyon süreçleri ile bu işlemlerin gerçekleştirildiği cihaz ve sistemler kullanım amacına yönelik olarak tanıtıldı.

3.1 Malzeme Üretimi

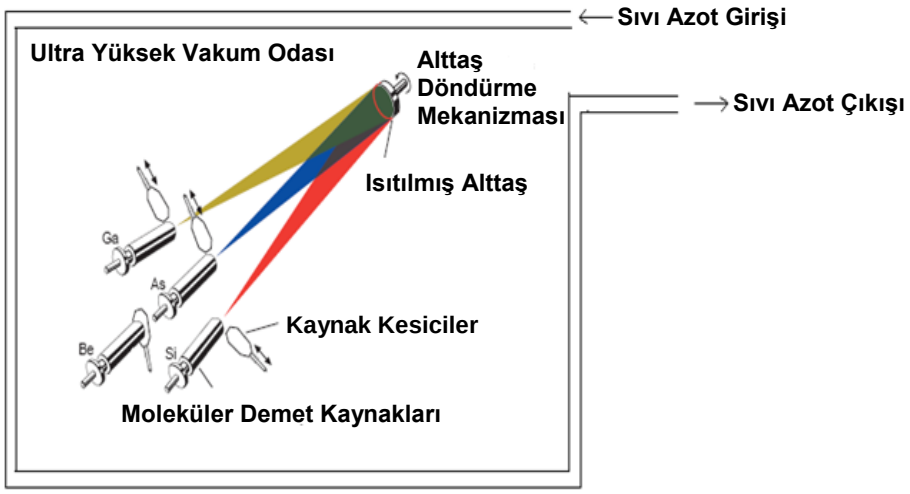
Proje kapsamında geliştirilen seyreltik azotlu LED aygıtlarının yarıiletken malzeme üretimi, Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi (Gazi-FOTONİK) bünyesinde bulunan katı kaynaklı V80H Moleküler Demet Epitaksi (MBE) sisteminde gerçekleştirildi.

3.1.1 Moleküler Demet Epitaksi (MBE) Sistemi

Moleküler Demet Epitaksi (Molecular Beam Epitaxy, MBE) tekniği, ultra yüksek vakum (~10^{-11} mbar) ortamında yüksek saflıktaki kaynak malzemelerin buharlaştırıldığı bir tekniktir. Bu teknik, yüksek kalitede ince film tek kristal büyütmek için geliştirilmiş en ideal tekniklerden bir tanesindir (Herman, 1996; Parker, 1985; Varriano, 1992). Termal knudsen kaynaklarında uygun elementlerin buharlaştırılmasıyla üretilen atomik/moleküler demetler, ısıtılmış bir alttaş üzerine gönderilerek tek kristal katmanların oluşması sağlanır. Temel olarak MBE işleminin şeması Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Büyütülmek istenilen yapının elementleriyle yüklenmiş olan kaynakların sıcaklığı, istenilen alaşım oranını elde edecek şekilde birbirinden bağımsız olarak ayarlanabilmektedir. Büyütülen katmanların istenilen kalınlıkta ve kompozisyonda olabilmesi için kaynaklar ile alttaş arasında mekanik kesiciler bulunmaktadır. MBE sisteminde büyütme odası, sıvı azotla soğutulan bir bölge ile çevrilidir. Sıvı azot sayesinde, kaynak hücreler arasında olabilecek termal etkileşme minimuma indirilir ve ortamda bulunan kalıntı gazlar soğuk yüzeyde tuzaklanarak büyütülen filmde istenmeyen safsızlıkların oluşumu önlenir.

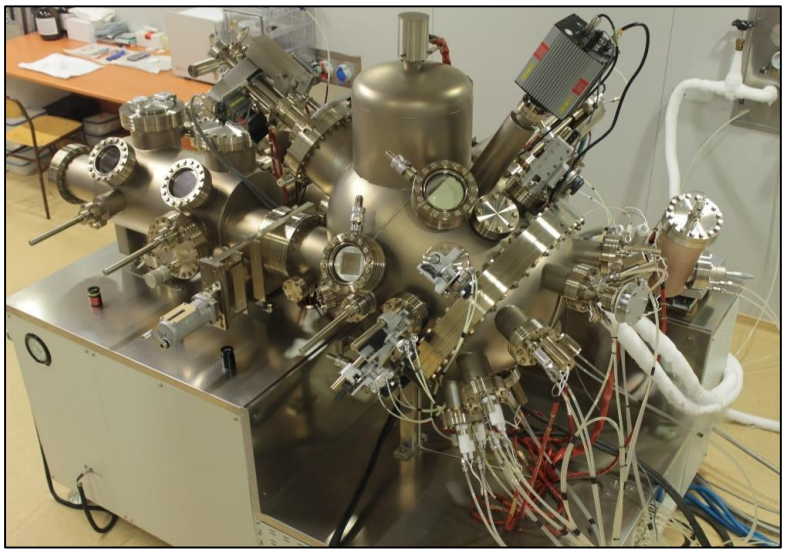
MBE tekniğinde büyütme oranı, diğer epitaksiyel büyütme tekniklerine göre oldukça düşüktür. Bu düşük büyütme oranı, istenilen bileşim ve katkı atomu oranının ayarlanabilmesini sağlar. Kaynak kesicilerin hareketini 1 saniyeden daha kısa bir sürede tamamlaması, büyütmenin kontrolü için oldukça önemlidir. 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.

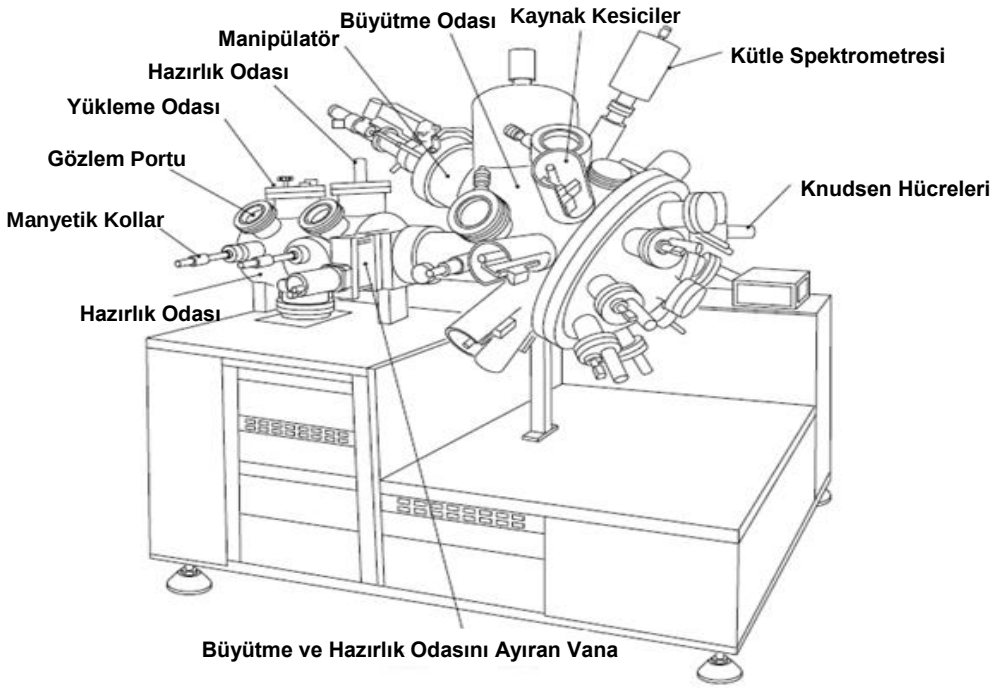


Şekil 3.1. MBE işleminin şematik diyagramı

VG-Semicon V80H-MBE sistemi: Gazi-FOTONİK'de kurulu VG-Semicon V80H-MBE Sisteminin resmi Şekil 3.2 'de ve şematik gösterimi Şekil 3.3'de verildi. Bu sistem, IIIA grubundan Ga, In, Al kaynaklarına, VA grubundan As, P, N ve katkı olarak kullanılan Si, Be kaynaklarına sahiptir. Sistemde, azot (N) kaynağı olarak yüksek saflıktaki (%99.9999) azot gazının (N_2) N atomuna ayrıştırılmasını sağlayan N RF-plazma kaynağı kullanılmaktadır.



Şekil 3.2. Gazi-FOTONİK'de bulunan V80H model MBE sistemi



Şekil 3.3. 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, alttaş ısıtıcısı, homojenlik sağlamak için alttaş döndürücü, alttaşı yüklemek ve transfer yapabilmek için hareket edebilen manyetik tutucular, 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 manyetik tutucular, 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 ve alttaşın döndürülmesi bu bilgisayar yardımıyla sürekli 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.

3.2 Yapıların Karakterizasyonları

Büyütülen kalibrasyon numunelerinin ve LED yapılarının yapısal, elektriksel ve optik analizleri aşağıdaki sistemler ve uygun yöntemlerle gerçekleştirildi.

3.2.1 Yüksek Çözünürlüklü X-ışını Kırınımı (HRXRD)

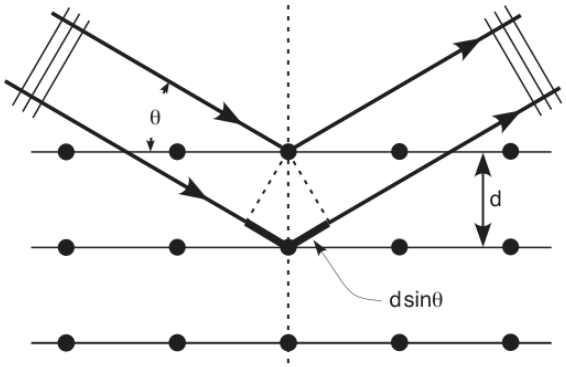
Kırınım deneyleri, kristalleşmiş malzemelerin yapısal özelliklerini belirlemek için kullanılan tekniklerdir. X-ışını kırınımı (XRD), büyütülen tabakaların kalınlığını, çoklu yapıların alaşım oranlarını, ince filmlerde oluşan gerginliği ve kusur tiplerini belirlemeye yarayan çok yönlü bir deneysel tekniktir. XRD'nin çalışma prensibi, kristaldeki örgü parametreleri ile aynı mertebede dalgaboyuna sahip X-ışını dalgalarının kristalde kırınıma uğraması olayına dayanır (Suryanarayana, 1998). Bütün kırınım deneylerinin temeli Şekil 3.4 'de gösterilen Bragg kanununa dayanır ve Eş. 3.1 ile verilir.

$$2dSin\theta = n\lambda \tag{3.1}$$

Burada *d* özdeş düzlemler arasındaki uzaklık, θ kırınım açısı ve λ kullanılan X-ışınının dalgaboyudur. Birim hücresi *a* örgü parametresi ile karakterize edilen kübik yapılı bir kristal için düzlemler arasındaki uzaklık ve örgü parametresi arasındaki ilişki Eş. 3.2 ile verilmektedir (Suryanarayana, 1998).

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

Burada *h, k* ve *l* miller indisleridir. Bu temel eşitlikler kullanılarak yapılan analizler malzemeler hakkında detaylı yapısal bilgiler verebilir.



Şekil 3.4. Kristal düzlemlerinden X-ışınlarının saçılması

Belirlenen örgü parametresi kullanılarak $A_xB_{1-x}C$ biçimindeki bir epitaksiyel alaşımdaki A elementinin oranı x, Vegard yasası ile Eş. 3.3'deki gibi belirlenebilir (Zhou, 2001).

$$a_0 = xa_{AC} + (1-x)a_{BC} \tag{3.3}$$

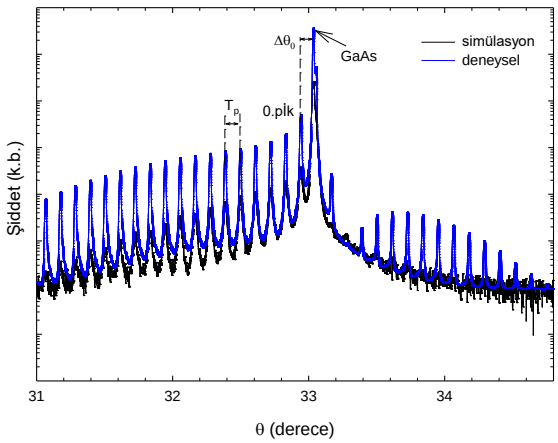
Burada a_0 ABC katmanının örgü parametresi, a_{AC} ve a_{BC} sırasıyla AC ve BC bileşiklerinin örgü parametreleridir.

Çoklu kuantum kuyu (MQW) içeren yapıların XRD desenlerinin analizlerinden kuyu genişliği, bariyer yüksekliği ve alaşım oranlarının belirlenebilmesi de mümkündür.

Örnek olarak InGaAs/GaAs MQW yapısına ait HRXRD deseni Şekil 3.5'de verildi. Burada, GaAs alttaşa ait pikin dışında gözlenen periyodik pikler InGaAs QW 'lere karşılık gelen kırınım pikleridir. Bu pikler kuantum kuyularına ait uydu pikleri olarak adlandırılır. 0. uydu pikinin alttaş pikinden açısal ayırımı ($\Delta\theta_0$) yapıdaki In alaşım oranının ortalama değerinin bir ölçüsüdür.

$$\langle x \rangle = x_w L_w / (L_w + L_b) \tag{3.4}$$

Burada x_w kuyudaki In oranı, L_w ve L_b, sırasıyla InGaAs kuyu genişliği ve GaAs engel genişliğidir (Sanz-Hervas, 1997).



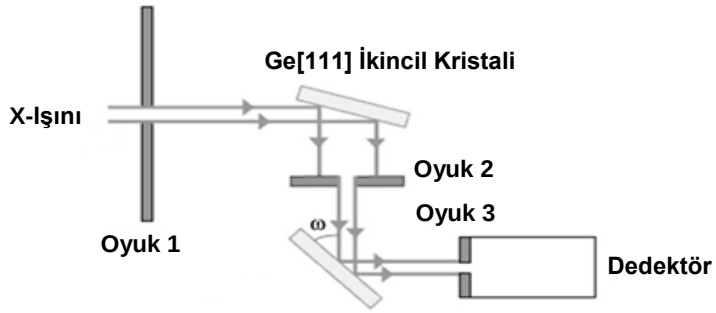
Şekil 3.5. InGaAs/GaAs MQW yapısı (004 düzlemi) için XRD deseni. GaAs pikinin solunda oluşan pikler kuantum kuyularına ait uydu piklerini temsil etmektedir (Kınacı, 2009)

Alttaş ve üzerine büyütülen epitaksiyel tabakalar arasında örgü uyumsuzluğu varsa gerilmeler (strain) oluşabilir. Bu gerilmeler, oluşturulan yapının opto-elektronik özelliklerini etkileyebilir. a_l ve a_0 sırasıyla tabakanın ve alttaşın örgü sabitlerini göstermek üzere gerilme (strain)

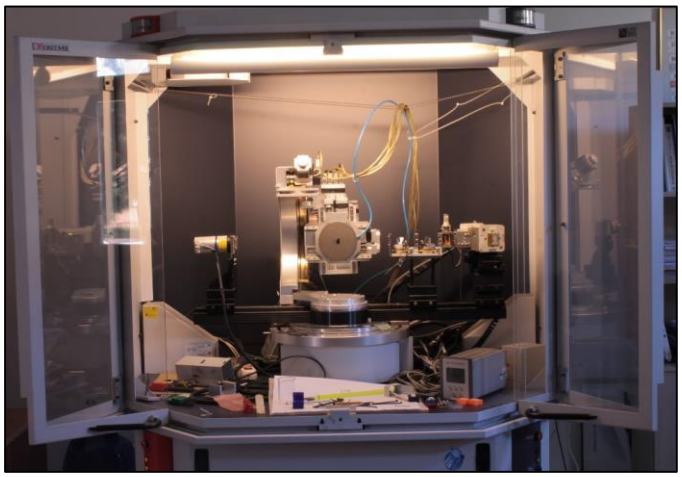
$$\varepsilon = \frac{|a_l - a_s|}{a_s} \tag{3.5}$$

eşitliği ile hesaplanır.

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 3.6'da verildi. X-ışını demeti ilk olarak monokromatördeki yüksek kaliteli bir kristale çarparak kırınıma 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 ω açısıyla döndürülür ve kırınan demet şiddeti kaydedilir.



Şekil 3.6. Yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınım düzeneği



Şekil 3.7. Bruker D8 Discover cihazının genel görünümü

Proje kapsamında büyütülen numunelerin HRXRD ölçümleri, Gazi-FOTONİK bünyesinde bulunan Bruker D8 Discover XRD cihazında gerçekleştirildi. Bu cihaz Ge (220) yönelimli dört kristal monokromatöre ve X-ışını kaynağı olarak CuKα1 (λ=1,540 Å)'e sahiptir. Cihazın genel

görüntüsü Şekil 3.7 ’de verildi. Elde edilen kırınım desenlerinin alaşım oranı, dinamik kırınım teorisinin Takagi-Taupin denklemlerinin (Takaqi, 1962) çözümüne dayanan LEPTOS yazılımı kullanılarak deneysel verilerin simüle edilmesi ile belirlendi.

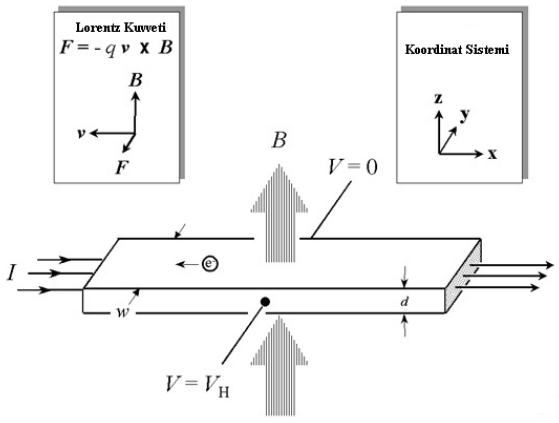
3.2.2 Hall Etkisi Sistemi

Hall etkisi ölçümü, günümüzde herhangi bir yarıiletken malzemenin elektriksel karakterizasyonunda kullanılan en önemli yöntemlerden biridir. Hall ölçümü, yarıiletken malzemenin taşıyıcı yoğunluğunun, taşıyıcı hareketliliğinin (mobilite), özdirencinin ve tipinin belirlenmesini sağlar (Singh, 2003).

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. Sapan 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. Manyetik alan altındaki elektronun hareketi Şekil 3.8 ‘de verildi. Bu yük birikimi Hall voltajı (V_H) denilen bir voltaj oluşturur ve yarıiletkenin iki tarafı boyunca bir potansiyel farkı meydana getirir. V_H, Eş. 3.6 ile verilir.

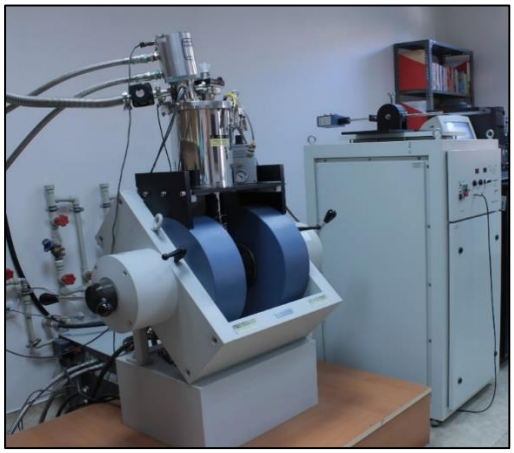
$$V_H = \frac{IB}{nqd} \tag{3.6}$$

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



Şekil 3.8. Manyetik alan altında elektronların hareketi

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



Şekil 3.9. Lake Shore 7700 serisi Hall etkisi ölçüm sistemi

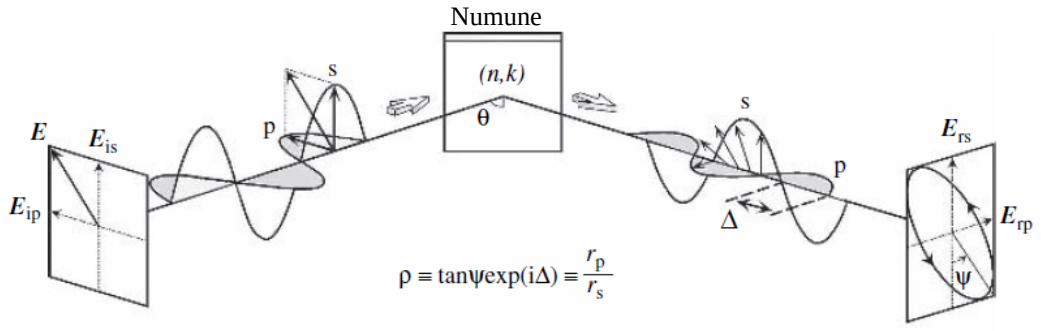
Bu projede, Şekil 3.9 'da resmi verilen Lake-Shore marka Hall etkisi ölçüm sistemi kullanıldı. Lake Shore Hall etkisi sisteminde helyum tüpü kryostatta kapalı devre soğutma yapılmasını sağlar. Kryostat iç kısmının vakumlanması için bir küçük turbo moleküler pompa kullanılır. Bu sistemde numune kryostat içinde numune tutucuya yerleştirilir ve numune bobinlerin oluşturduğu manyetik alan dik olacak şekilde yerleştirilir. Bunun sebebi ise uygulanan manyetik alanın tam olarak etki etmesini sağlamaktır. Sistemin kontrol ünitesinden malzemeye uygulanacak olan sabit akım, manyetik alan ve sıcaklık değerleri kontrol edilebilir. Kontrol sisteminin bağlı olduğu bilgisayar ölçüm sırasındaki verileri alarak programa aktarır ve bu program sayesinde Van der pauw ve Hall etkisi ölçüm teknikleri kullanarak özdirenç (ρ), taşıyıcı yoğunluğu (n) ve Hall katsayısı (R_H) değerlerinin belirlenmesi sağlanır.

3.2.3 Spektroskopik Elipsometre (SE)

Elipsometre, katı malzemelerin (metaller, yarıiletkenler, yalıtkanlar) optik özelliklerini belirlemek için kullanılan bir tekniktir. Bu teknik yardımıyla, filmin kalınlığı, kırılma indisi, sönüm katsayısı, kristalitesi, kompozisyonu gibi özellikleri analiz edilebilmektedir. Ayrıca elipsometrik verilerin analizleri ile yarıiletken katmanların elektronik bant yapısı hakkında bilgiler elde edilebilmektedir.

Elipsometre, numune yüzeyine lineer polarize olarak gönderilen ışığın, yüzeyden yansıdıktan sonra polarizasyonundaki değişimini ölçme ve analiz etme yöntemi olarak tarif edilebilir.

Yansıyan ışık, eliptik polarize olduğundan tekniğin adı elipsometre olarak isimlendirilmiştir. Bir elipsometre sisteminde yüzeye gelen ışığın polarizasyonu, yüzeye gelme açısı ve yansıyan ışığın polarizasyonu ile elipsometrik parametreler olarak bilinen ψ ve Δ nicelikleri Şekil 3.10 'da verildi. Burada, ψ p ve s-polarize olmuş ışık dalgalarının genlik oranı, Δ ise faz farkıdır (Fujiwara, 2007). Elipsometrede gelen ve yansıyan ışık dalgalarının polarizasyon durumları s ve p- polarizasyon koordinatları ile tanımlanır. E_{ip} ve E_{is} gelen ışığın alan vektörünün bileşenleridir. Yansıma sonrasında elektrik alan vektörlerinin doğrultusu, p ve s-polarizasyon için ters yöne döner. Elipsometre analizi için bu değişim önemlidir. Gelen ışığın alan vektör bileşenleri aynı olduğu durumda polarizasyonları arasındaki faz farkı sıfır olur. Yansıma durumunda, p ve s-polarizasyonlarının genlik ve fazları farklıdır. Spektroskopik elipsometrede, (ψ, Δ) spektrumları ışığın dalga boyunun değişimine bağlı olarak ölçülmektedir. Diğer bir ifadeyle, p ve s-polarizasyonları yardımıyla yansıyan ışığın değişimi, polarizasyon durumundaki değişim olarak ölçülür (Fujiwara, 2007).



Şekil 3.10. Elipsometrenin ölçüm prensibi (Fujiwara, 2007)

Elektromagnetik dalga optik sistemlerle etkileştiği zaman ışığın polarizasyon durumu değişir. Elipsometrik parametreler Δ ve Ψ değerleri ile verilir. Spektroskopik elipsometre ölçümleri morötesi/görünür ve kızılötesi bölgede yapılabilmektedir. Gelme düzlemine paralel polarize yansıma genliğinin (r_p), dik polarize olmuş yansıma genliğine (r_s) oranı, $\rho = r_p / r_s$, elipsometrik bir parametredir ve psi ve delta değerlerine

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan\Psi e^{i\Delta} \tag{3.7}$$

ifadesi ile bağlıdır (Fujiwara, 2007). Bu denklemler elipsometrik parametrelerle Fresnel katsayıları, dolayısı ile numunenin optik sabitleri arasında ilişki kurulabileceğini gösterir. Örneğin numunenin dielektrik fonksiyonu, polarizasyonunun değişimi bilgilerinden çıkarılabilir.

Numuneye ait dielektrik fonksiyonu $\varepsilon = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2$ ile verilir (KIM, 1998). Burada, ε_1 dielektrik fonksiyonun reel kısmı, ε_2 dielektrik fonksiyonun sanal kısmıdır. Dielektrik fonksiyonu,

$$\varepsilon = \sin^2\phi + \sin^2\phi \tan^2\phi \frac{(1-\rho)^2}{(1+\rho)^2} \tag{3.8}$$

şeklinde ifade edilebilir (Kim, 1998). Burada, ϕ ışık demetinin geliş açısıdır.



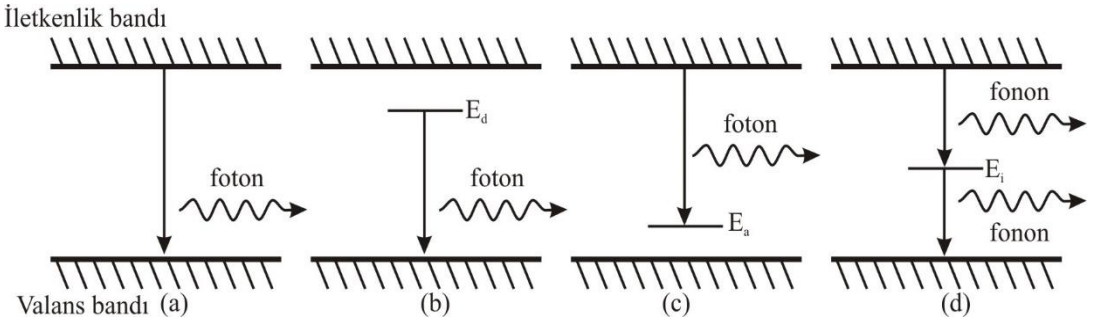
Şekil 3.11. Spektroskopik elipsometre cihazı

Proje kapsamındaki numunelerin optik analizinde kullanılan ve Gazi-FOTONİK'de bulunan Spektroskopik Elipsometre (Jobin Yvon-Horiba) sistemi Şekil 3.11 'de gösterildi. Bu sistem, 260-2100 nm dalga boyu aralığında ölçüm imkânı veren, 0º ve 180º arasında açı değişim özelliğine sahiptir. Ayrıca, sistem 75 W gücünde Xenon ışık kaynağı, otomatik goniometre üzerine monte edilmiş bir polarizör ve modülatör başlığı, monokromatör, motorize numune platformu ve kontrol biriminden oluşmaktadır.

3.2.4 Fotolüminesans (PL)

Fotolüminesans spektroskopisi, yarıiletken malzemelerin elektronik yapılarını ve optik özelliklerini araştırmada kullanılan, malzemeye zarar vermeyen deneysel bir yöntemdir. 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 ışıma olayına fotolüminesans veya foto-ışıma 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.

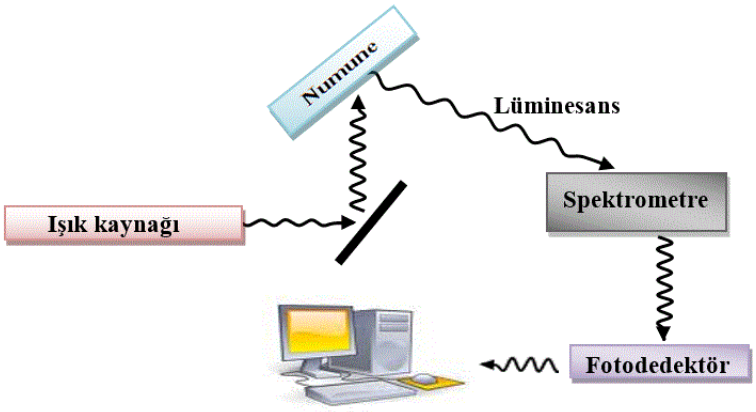
Bir yarıiletkenin fotolüminesans olayında üç temel süreç meydana gelir. Bu süreçler; i) Uyarılma, ilk olarak incelenen malzeme tek dalgaboylu optik uyarma kaynağı tarafından uyarılır. hv kadar bir enerjiye sahip uyarıcı fotonlar elektronları valans bandından iletim bandına çıkartır. Optik uyarma kaynağının enerjisi yarıiletkenin yasak bant aralığından (E_g) büyük olduğunda elektron-deşik çiftleri oluşur. ii) Termalizasyon, $hv \geq E_g$ için üretilen elektron-deşik çiftleri ilk anda yüksek bir kinetik enerjiye sahiptir. Bu fazla enerjilerini akustik ve optik fonon yayınımı yoluyla hızlı bir şekilde (0,2-100 ps) boşaltarak bant kenarlarına doğru hareket eder ve termal denge durumlarına ulaşırlar. iii) Yeniden birleşme, elektron-deşik çiftleri yeniden birleşirler. Bu işlem sonucunda fazlalık enerji, ışımalı veya ışımasız olarak salınır. Lüminesans geçişlerinin şematik gösterimi Şekil 3.12'de verildi.



Şekil 3.12. (a-c) Işımalı geçiş türleri: (a) banttan banda (b) verici seviyesinden valans bandına (c) iletkenlik bandından alıcı bandına, (d) bir orta seviye yoluyla ışımasız geçiş (Gfroerer, 2000).

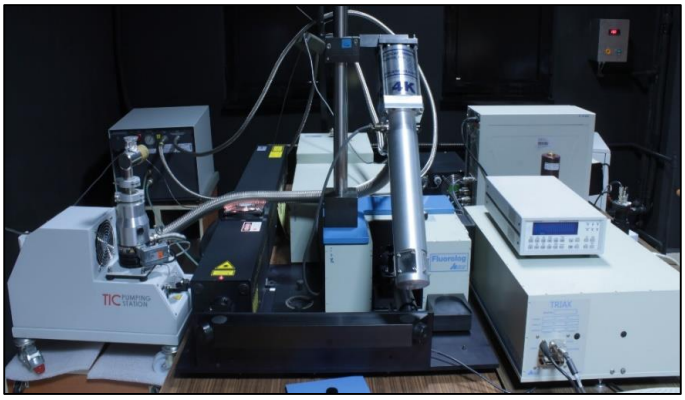
Banttan banda geçişler, valans bandındaki serbest deşiklerle iletkenlik bandındaki serbest elektronlar arasındaki birleşmelerden kaynaklanan geçişlerdir. Yüksek sıcaklık ve uyarım yoğunluğunun yüksek olduğu durumlarda meydana gelir. Direkt bant aralıklı bir yarıiletkende enerjinin korunumuna göre uyarıcı fotonun enerjisi $h\nu = E_s - E_i$ ile verilir.

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 ışımasına 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 3.13'de verildi (Gfroerer, 2000).



Şekil 3.13. Fotolüminesans (PL) ölçümü için tipik deneysel düzenek

Projede üretilen 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, Şekil 3.14'de verildi.



Şekil 3.14. Jobin Yuvon Florog-550 PL ölçüm sistemi

3.2.5 İkincil İyon Kütle Spektrometresi (SIMS)

İkincil iyon kütle spektroskopisi (SIMS), numuneleri birkaç keV enerjili odaklanmış birincil iyon ışını ile bombardıman edip, numunelerin yüzeyinden yayılan ikincil iyonları analiz ederek katı yüzeyler hakkında elementel ve moleküler bilgi edinilmesini sağlayan bir yüzey analiz tekniğidir. Bu ikincil iyon demeti, elementel izotopik ya da moleküler bileşimi belirlemek için bir quadropol kütle spektrometresi ile ölçülmektedir. SIMS sürecinde, yüzey atomik dağılım analizinin yanında, numunenin seçilen bir matris alanının nm boyutunda aşındırılarak püskürtülmesi ile derinlik boyunca nicel analiz yapmak da mümkündür.

SIMS, statik ve dinamik olmak üzere iki modda nicel malzeme analizi yapabilmektedir. Statik

mod ile çok düşük iyon dozları (~1x10^{12} iyon/cm^2) kullanılarak yüzey analizleri yapılabilir. Bu mod, mono-tabaka kaplama, oksidasyon ve kontaminasyon araştırmaları için uygundur. Dinamik mod ise, yüksek iyon dozları ile malzemenin yüzeyinden daha derin bölgelerine aşındırma yapılabilmektedir.

Proje kapsamındaki numunelerin analizinde kullanılan ve Gazi-FOTONİK'de bulunan Hiden Analitic marka SIMS sistemi (Şekil 3.15), 0-300 a.k.b aralığındaki atom ya da bileşimlerin analizini gerçekleştirebilmektedir. Malzeme içerisindeki her bir türün miktarı, aşındırma zamanı başına sayı olarak elde edilmektedir. Hiden-SIMS sistemi, ultra yüksek vakum (10^{-9}-10^{-10} mbar) şartlarında çalışmaktadır. Sistem, elektropozitif elementlerin iyonizasyonu için 1-5 keV enerjili 1 μA akım üreteçli ve 100 μm işleme kapasiteli bir Oksijen (O) kaynağına; elektronegatif malzemelerin iyonizasyonu için ise 1-5 keV enerjili 100 nA akım üreteçli ve 80 μm işleme kapasiteli bir Sezyum (Cs) kaynağına sahiptir.

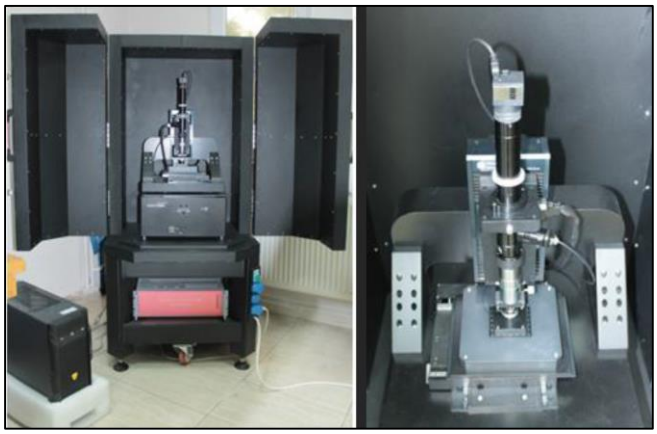


Şekil 3.15. Hiden Analitic SIMS sistemi

3.2.6 Atomik Kuvvet Mikroskopu (AFM) Ölçümleri

AFM, yüzey topografisini angstrom (Å) mertebesinden 100 mikrona kadar ölçebilen ve geniş kullanım alanı olan bir metottur. Bu teknik, büyük bir doğrulukla atomik ve nanometrik ölçekte ölçülen yüzeyin özelliklerini haritalamak için numune yüzeyine göre araştırma ucunun uzaysal pozisyonunu kontrol etme yeteneği sağlayan piezoelektrik güç çeviricilerin kullanımını temel alır. Sistem, örnek yüzeyini tarayan ve bilgi toplayan cantileverın (denge çubuğu) ucuna yerleştirilmiş çok ince bir iğne kullanılır. Atomik sivrilikteki bu uç ile numune yüzeyi taranır. Tarama esnasında iğne ucu ile numune yüzeyindeki atomlar arasındaki nanonewton mertebesindeki kuvvetler, cantileverın sapmasına neden olmaktadır. Bu sapma ölçülerek numune yüzeyinin topografisi elde edilir.

Proje kapsamında kullanılan numunelerin yüzey morfolojisi, Gazi-FOTONİK'de bulunan AFM sistemi (Şekil 3.16) kullanılarak incelendi.

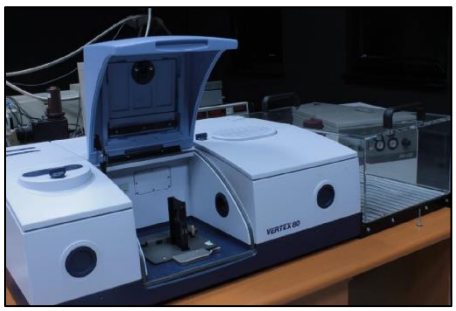


Şekil 3.16. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

3.2.7 Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Spektrometre Sistemi

FTIR, numunelerin kimyasal bağ analizlerinde kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem ile moleküler bağ karakterizesi yapılarak; katı, sıvı, gaz veya çözelti halindeki organik veya inorganik malzemelerin yapısındaki fonksiyonel gruplar, iki bileşiğin aynı olup olmadığı, yapıdaki bağların durumu, bağlı atomların türü ve bağlanma yerleri belirlenebilir.

Proje kapsamındaki numunelerin kimyasal bağ analizleri için Gazi-FOTONİK 'de bulunan Vertex 80 FTIR spektroskopi cihazı kullanıldı (Şekil 3.17). Cihazın çalışma aralığı en az 12.500-370 cm^{-1} aralığındadır. Yalıtılmış spektrometre hızlı kinetik tarama özelliğine sahiptir ve 4 cm^{-1} optik çözünürlükte saniyede en az 65 spektrum alabilir. Sistemin spektral çözünürlüğü katı, sıvı ve gaz numuneler için uygundur. Cihazda uzun ömürlü, hava soğutmalı ve yüksek enerjili DLTGS detektör, Broadband MCT detektör ve NIR bölgede çalışacak bir InGaAs detektör bulunmaktadır. Ayrıca cihazda tek yansımalı elmas kristalli bir ATR aksesuarı yer almaktadır.



Şekil 3.17. Vertex 80 FTIR spektroskopi cihazı

3.3 LED Fabrikasyonu

LED fabrikasyonu, bir dizi litografi ve metalizasyon sürecini içeren işlem adımlarıyla gerçekleştirilmektedir. Fabrikasyon işlem adımları kısaca özetlenecek olunursa, MBE tekniği kullanılarak büyütülen LED yapısı yüzeyine fotorezist malzemenin kaplanması, foto maskedeki desenin pozlama sistemi yardımıyla fotorezist yüzeyine transfer edilmesi, desenin geliştirilmesi, desenin aşındırma sistemi yardımıyla ortaya çıkartılması ve metalizasyon işlemleri ile omik kontakların oluşturulması olarak sıralanabilir. LED fabrikasyonu sürecinde kullanılan sistem ve yöntemler aşağıda sunulmuştur.

3.3.1 Maske Hizalama Sistemi

Yarıiletken malzemeler, yüksek frekanslı bileşimler ve standart olmayan tabanlar için Şekil 3.18'de gösterilen, Karl-Süss MJB4 model maske hizalama sistemi, çeşitli opto-elektronik cihazların fabrikasyonu ve MEMS uygulamaları için kullanılmaktadır. Sistem, kalınlığı 0.1 mm'den 0.7 mm'ye kadar 2'', 3" ve 100 mm çapında dilimlere yumuşak, sert ve vakum kontağı yapabilecek tutuculara sahiptir. Malzemenin boyutu, yüzey düzlüğü ve temiz oda şartlarına bağlı olarak; vakum kontak modu için <0.8 µm, yumuşak kontak modu için 2.0 µm ve sert kontak modu için 1.0 µm çözünürlüğe sahiptir. Maskeleme işlemlerinde dilimlerin fotorezist kaplamaları için spin (dönel) kaplama sistemi de mevcuttur.

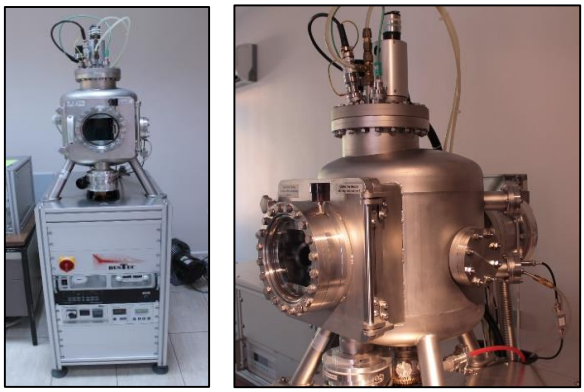


Şekil 3.18. Karl Süss MJB4 Maske hizalama sistemi

3.3.2 Vakum-Buharlaştırma (Evaporasyon) Sistemi

Numunelerin metalizasyon işlemleri Gazi-FOTONİK 'de bulunan ve Şekil 3.19'da verilen BesTec marka vakum-buharlaştırma sistemi ile yapıldı. Buharlaştırma işlemi, turbo moleküler

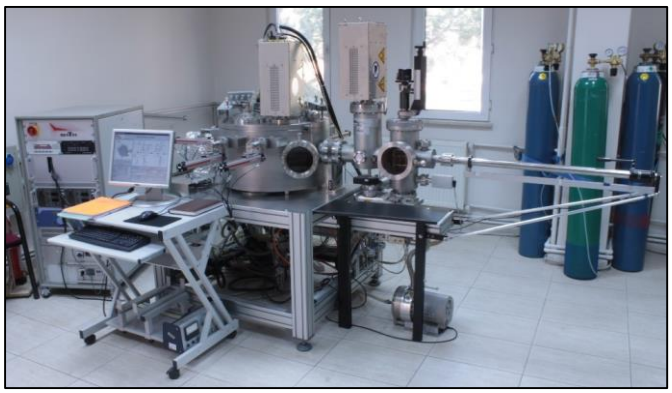
pompa ile 10^{-7} mbar basınca kadar inildikten sonra yüksek saflıktaki pota içerisine yerleştirilen yüksek saflığa sahip metal malzemenin uygulanan akım ile ısıtılıp buharlaştırılması ile gerçekleştirilmektedir. Sistem, Au, Pt, Ni, Al, AuNiGe, AuZn, vb. gibi farklı metallerden her işlemde 4 adedini numune yüzeyine kaplayabilecek biçimdedir. Ayrıca buharlaştırma işlemi esnasında numuneler ısıtılabilmekte ve homojen bir kaplama için döndürülebilmektedir.



Şekil 3.19. BesTec vakum-buharlaştırma (evaporasyon) sistemi

3.3.3 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.



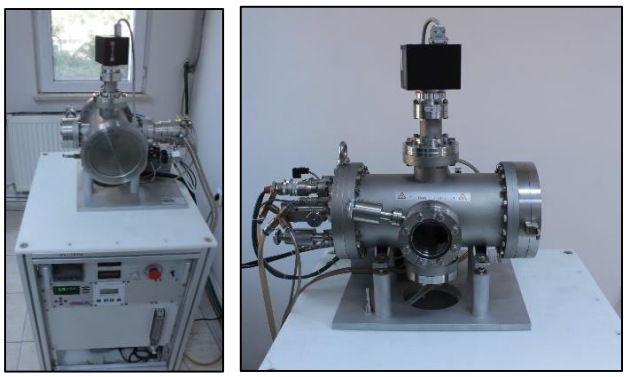
Şekil 3.20. BesTec püskürtme (sputtering) sistemi

Proje kapsamında büyütülen numunelerin üzerinde Au metal kontak oluşturma işlemi, Gazi-

FOTONİK'de bulunan ve Şekil 3.20'de 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 silindir 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.

3.3.4 Hızlı Isıl Tavlama Sistemi (RTA)

Hızlı ısıl 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. Tavlama işlemi, turbo moleküler pompa ile 10^{-8} mbar mertebelerindeki vakum ortamında gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3.21. Hızlı Isıl Tavlama (RTA) Sistemi

Proje kapsamında, vakum-buharlaştırma tekniği ve püskürtme tekniği ile metal kontakları oluşturulan numuneler RTA sisteminde tavlanarak metal kontakların omikleştirilmesi sağlandı. Tavlama işlemlerinde kullanılan ve Gazi-FOTONİK 'de bulunan RTA sistemi Şekil 3.21'de verildi.

3.3.5 Profilometre Sistemi

Dektak yüzey profilometresi ince ve kalın tüm numuneler için kullanılabilen 100 Å altındaki basamakları ölçebilen basamak yüksekliği ölçüm aracıdır. Nanometre mertebesindeki yüzey ölçümleri yapabilen Dektak 150 elmas uçlu stylusun altındaki numunenin hareketi ile ölçümü

alır. Yüksek duyarlı tabla kullanıcının uzunluk, hız ve stylus gücü programlamasına göre stylusun altındaki numune hareket eder. Numune hareket ettikçe, stylus yüzeyi belirlenen uzunlukta dikey olarak tarar. Tarama uzunluk aralığı 50 μm-55 mm arasındadır. Yüzey profilometresinde X-Y doğrultusunda da tarama yapılabilir. Ölçüm alındıktan sonra Veeco yazılım programı ile ölçümler 2 boyutlu, 3 boyutlu şekilde incelenebilir, X-Y doğrultusuda yüzey profili çıkarılabilir, yüzeyin biçimi, düzlükler, pürüzlülük ve dalgalanmalar incelenebilir, basamak yüksekliği ölçülebilir.

Proje kapsamında Veeco Dektak-150 Profilometre Sistemi numunelerin üretimi sonrası kalınlıklarının belirlenmesinde ve fabrikasyon adımlarında kullanılmıştır (Şekil 3.22).



Şekil 3.22. Veeco Dektak-150 Profilometre Sistemi

3.4 Aygıt Karakterizasyonu

3.4.1 Aygıt Parametre Analizörü

Fabrikasyonu yapılan LED aygıtlarının çıktı parametreleri, Gazi-FOTONİK bünyesinde bulunan Keithley 4200-SCS sistemi ile gerçekleştirilecektir. Yarıiletken karakterizasyon sistemi olarak kullandığımız sistem ile elektriksel ölçümler yapılabilmektedir. Sisteminin maksimum gücü 1A-20W ve minimum gücü ise 100mA-2W olarak ayarlanabilmektedir. 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, özdirenç, n idealite faktörü, seri direnç gibi birçok aygıt parametresi belirlenebilmektedir. Işıkta ve karanlıkta akım-gerilim (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. Ölçüm istasyonu elektriksel olarak her türlü kaynaktan izole edilmiştir ve gürültüden minimum miktarda etkilenmektedir.

Üretilen LED aygıtların çıktı parametreleri, oda sıcaklığı I-V ölçümleri ile Gazi-FOTONİK bünyesinde bulunan Keithley 4200-SCS sisteminde gerçekleştirildi (Şekil 3.23).



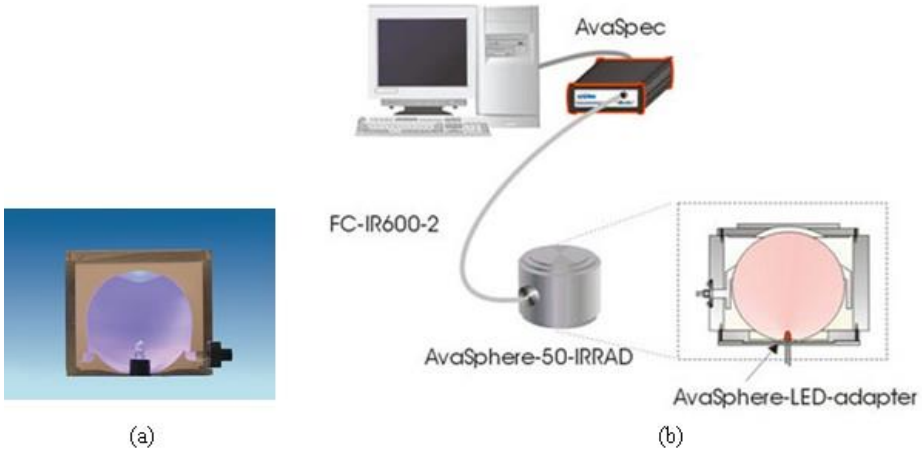
Şekil. 3.23. Keithley 4200-SCS aygıt parametre analizörü

3.4.2 LED Işıma Ölçüm Sistemi

Çeşitli renklerde ve parlaklıkta LED aygıtların üretiminden beri bu aygıtların optik karakteristiklerinin doğru bir şekilde belirlenmesi önem kazanmıştır. LED'lerin optik özelliklerini ölçmenin fotometri ve radyometri olmak üzere iki yolu vardır. Fotometri, sadece insan gözünün algıladığı görünür radyasyon (ışıma) ile ilişkilidir. Radyometri ise, insan gözü algısı (tepkisi) ile sınırlı değildir. Hem fotometri hem de radyometride LED, ışık yayma gücü veya şiddet bakımından karakterize edebilir. Işık yayma gücü, lümen veya watt cinsinden LED'den yayılan akı yönü gözetilmeksizin toplanan ve ölçülen tüm akıdır. Şiddet, genellikle LED'in ekseni boyunca olan gözlemciye doğru yönelen birim katı açı başına akıdır ve candela cinsinden verilir.

LED'den gelen toplam ışık akısını ölçmenin basit ve hızlı yolu bir toplama küresi ve spektrometre kullanmaktır. Toplama küresi optik radyasyonu ölçmek için basit bir düzenektir. Şekil 3.24(a)'da verilen toplama küresinin iç yüzeyi mükemmel bir yayıcıdır ve düzgün yansımaya sahiptir.

Proje kapsamında, LED ışıma ölçümleri için Gazi-FOTONİK bünyesinde bulunan AVANTES marka LED ışınım ölçme sistemi kullanılmıştır [Şekil 3.24(b)]. Sistem, LED ışınım çıktı parametrelerini 180-1100 nm dalgaboyu aralığında analiz edebilmektedir. Sistem bir halojen ışık kaynağı (AvaLight-HAL-CAL-ISS) ile AvaSoft-IRRAD sistemi kullanılarak kalibre edilebilir. Spektrometre yazılımı ile ölçülen spektral dağılımdan parametreleri hesaplamak ve kesin bir parlaklık (irradiance) ölçümü yapmak mümkündür. Ölçülen ışığın şiddeti, hesaplanabilmekte ve spektral parlaklık (irradiance) $\mu Wcm^{-2}nm^{-1}$ cinsinden kaydedilebilmektedir. Ayrıca, radyometrik nicelikler (µW/cm², µJoule/cm², µWatt veya µJoule), fotometrik nicelikler (Lux veya Lumen), renk koordinatları (X, Y, Z, x, y, z, u, v) ve renk sıcaklığı gibi çıkış parametreleri ayrı bir pencerede görüntülenebilmektedir. Buna ek olarak Scope modunda, X-Y Renklilik (Kromatik) diyagramının yanı sıra baskın dalgaboyu, saflık, merkez dalgaboyu, pik dalgaboyu gibi LED ölçümleri için faydalı parametreleri içeren ham veri elde edilir.



Şekil 3.24. (a) Toplama küresi (b) LED ışınım ölçümü için tipik deneysel düzenek

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Seyreltik azotlu III-V grubu GaAsPN tek-renkli, iki-renkli ve kuantum kuyulu LED yapılarının Si ve GaP alttaşlar üzerine yüksek kristal kalitesinde büyütülmesi ve LED aygıt üretiminin gerçekleştirilmesi amacıyla; numune büyütülmesi, büyütülen numunelerin analizleri, LED fabrikasyonları ve aygıt karakterizasyonları gerçekleştirildi. Bu kapsamda yapılan çalışmalar bölümler halinde detaylı olarak sunuldu. İlk olarak; kalibrasyon numunelerinin epitaksiyel büyütülmeleri ve analizleri, LED yapılarının büyütülmesi ve karakterizasyonları, LED fabrikasyonu ve LED çıktı parametrelerinin belirlendiği aygıt karakterizasyonları detaylarıyla sunuldu.

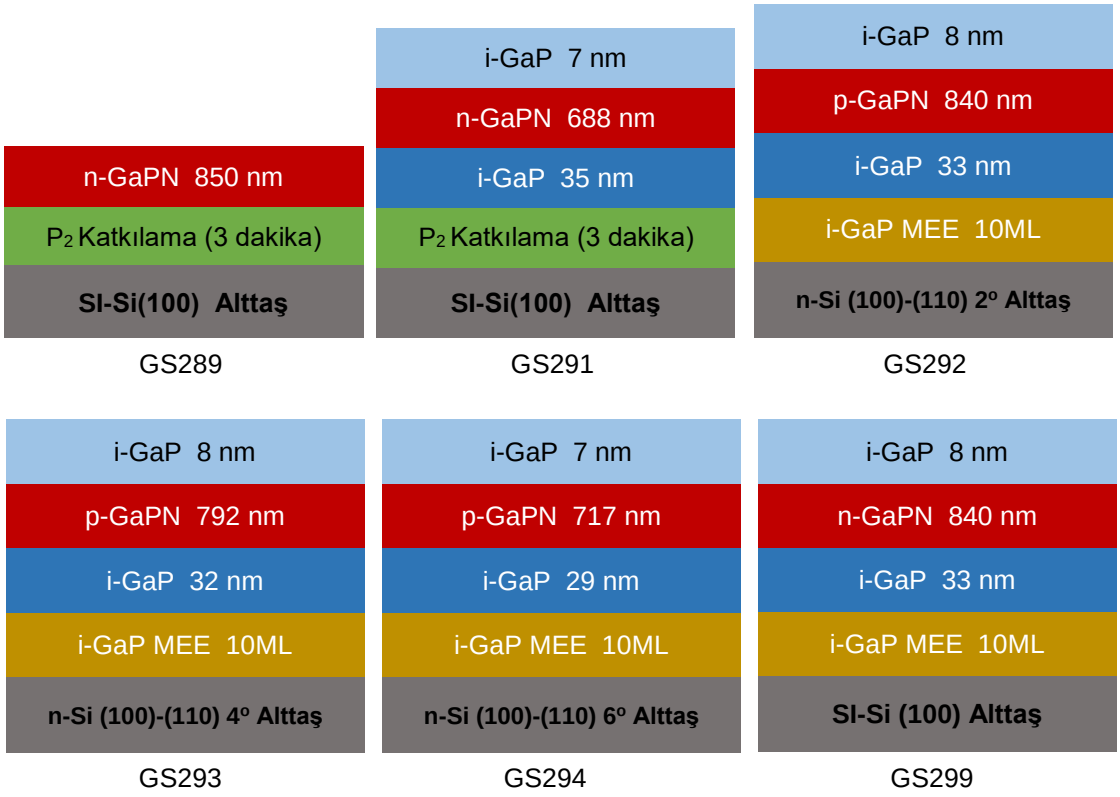
4.1 Kalibrasyon Numunelerinin Büyütülmesi ve Analizleri

LED yapılarını oluşturacak katmanlar için 10 adet kalibrasyon numunesi büyütüldü ve bu numuneler GS289, GS291, GS292, GS293, GS294, GS295, GS296, GS297, GS298 ve GS299 olarak isimlendirildi. Daha sonra büyütülen numunelerin karakterizasyon işlemleri gerçekleştirildi.

4.1.1 Si alttaşlar üzerine kalibrasyon numunelerinin büyütülmesi ve karakterizasyonları

Kalibrasyon Numunelerinin Büyütülmesi

Si alttaş üzerine GaP veya III-V grubu bileşimlerin büyütülmesinde faz kontrolü önemli bir problemdir. Bu problemin kaynağı Grup IV elementleri ile III-V grubu bileşimler arasındaki örgü simetrisindeki farklılıklardan kaynaklanmaktadır (Yu, 2004). Bu farklılık arayüzeyde anti-faz bölgelerinin oluşumuna neden olmaktadır. Bu problem, (100) yönelimli alttaşların (110) yönelimine birkaç derecelik açıyla kesilimi ile çözülebilmektedir. Öte yandan alttaş yüzeyine ilk önce MEE (migration enhanced epitaxy) tekniği ile alttaş yüzeyine ardışık elementel demet akılarını göndermekle gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca GaP'ın Si üzerine büyütülmesinde yüzeye belirli süre sadece P_2 akısı göndererek yüzeyde çekirdekleşme tabakası oluşturulması ve böylece GaP'ın düzgün büyümesinde kullanılan diğer bir yöntemdir. 111T655 numaralı TÜBİTAK projesi kapsamında büyütülen kalibrasyon örneklerinde bu yöntem tercih edilmiştir. Proje kapsamında Si alttaş üzerinde oluşturulacak LED yapılarının kristal kalitesinin arttırılması amacıyla kalibrasyon numuneleri büyütüldü. Si alttaş üzerinde büyütülen kalibrasyon numunelerinin analiz sonuçları yardımıyla en uygun büyütme tekniği belirlendi.



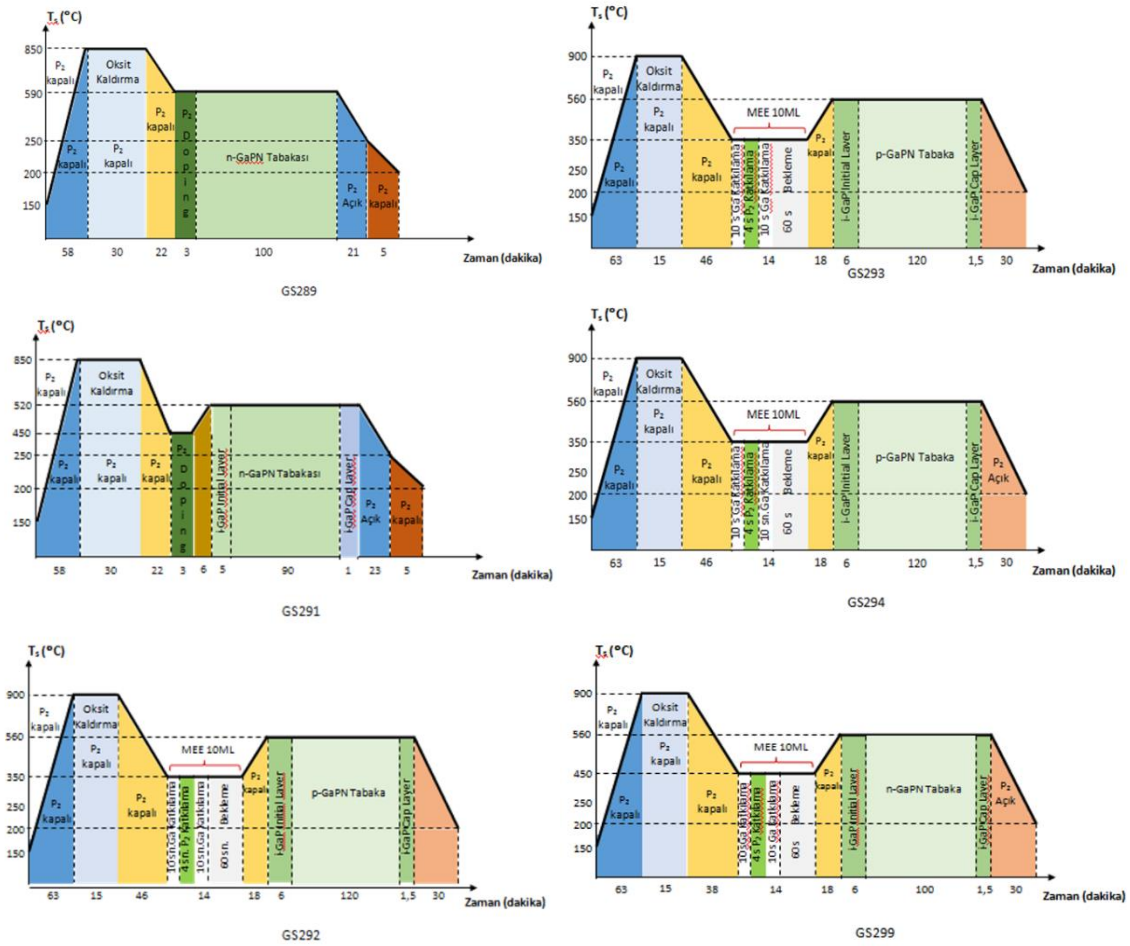
Şekil 4.1. Si alttaş üzerine büyütülen kalibrasyon numunelerinin şematik gösterimi

Bu proje kapsamında Si üzerine GaPN'ın büyütülmesinde yüzeye belirli süre sadece P_2 akısı göndererek yüzeyde çekirdekleşme tabakası oluşturulması ilk büyütülen iki kalibrasyon örneğinde (GS289 ve GS291) tercih edildi. Daha sonraki üç büyütmede (GS292, GS293 ve GS294) GaPN, (110) düzlemine 2°, 4° ve 6° lik açıyla kesilmiş (100) yönelimli n-tipi Si alttaşlar üzerine MEE tekniği ile P_2/Ga ardışık birikimi gerçekleştirilerek büyütüldü. Si alttaş üzerine son büyütülen numunede de (GS299) aynı yöntem kullanıldı.

MBE'de seyreltik azotlu yapıların büyütülmesinde reaktif azot atomlarının elde edilmesi gerekir. Bu reaktif azot atomlarını elde etmek için N_2 molekülü bir plazma ile kırılmalıdır. Bu işlem sistemimizde mevcut RF Plazma kaynağı kullanılarak gerçekleştirildi. Bu amaçla 280 W RF gücü ve 0.4 sccm N_2 akış oranı kullanılarak yapıdaki seyreltik azot miktarı sağlandı. Proje kapsamında %0.2-%0.6 sınırları içerisindeki miktarında azot atomlarının yapıya dahil edilmesi gerçekleştirildi. Kalibrasyon numunelerinin büyütülmesinde seyreltik azot konsantrasyonunun kalibrasyonu önemli bir yer tutmaktadır. Düşük miktardaki azot yerleşimi, yapı içerisinde katkı malzemesi gibi davranacaktır. Bu yapılardaki N oranının, büyüme oranı arttıkça azaldığı bilinmektedir. Bu değişim çoğunlukla lineer olmaktadır. RF kaynağı 280 W gücünde ve 0.4 sccm akış oranında tutularak, büyüme oranı 0.5 μm/h-0.60 μm/h aralığında değiştirildi. Bu

tasarımda büyütme sıcaklığı ve As(P) akısı veya akı oranı sabit tutuldu. Si alttaşlar üzerine büyütmelerde, GaAsPN ve GaPN yapısının doğrudan alttaş üzerine büyütülmesi örgü uyumsuzluğu oluşturacağından, alttaş üzerine önce bir ince GaP (<50 nm) katmanı büyütüldü. MBE tekniği ile büyütülen örneklerin şematik yapıları Şekil 4.1'de verildi.

Büyütmelerde kullanılan Si alttaşlar MBE'de hızlı yükleme odasına (FEL) yerleştirilerek işleme başlandı. FEL'e konan alttaş uygun vakum değerine (~1.0E-8-1.0E-9 mbar) ulaştıktan sonra hazırlık odasına alındı; su ve buharlaşabilen kirliliklerden arındırmak amacıyla Si alttaşlar 400 °C'de 2 saat ısıtıldı. Daha sonra 200 °C'ye soğutulan alttaşlar uygun vakum değeri sağlandıktan sonra büyütme odasına transfer edildi. Kalibrasyon örneklerinin büyüme diyagramları Şekil 4.2'de verildi. Manipülatöre yerleştirilen SI-Si alttaşlar 850 °C'ye ve yönelimli kesilmiş n-tipi Si alttaşlar 900 °C'ye kadar ısıtılarak yüzeylerindeki oksit katmanın uzaklaştırılması sağlandı ve tek kristal yapının ortaya çıktığı ve yüzeyin oksitten arındırıldığı RHEED ile gözlendi. GS289 ve GS291 numaralı numunelerde alttaş 590 ve 450 °C'ye soğutularak çekirdekleşme katmanının oluşabilmesi için 3 dakika P_2 buharı altında bekletildi ve Şekil 4.1'de sunulan diğer tabakalar büyütüldü. Büyüme tamamlandıktan sonra, yüzeyden muhtemel P_2 ayrılmalarını önlemek amacıyla P_2 akısı altında alttaş sıcaklığı 250 °C'ye düşürüldü ve örnek sistemden dışarıya 150 °C'de iken transfer edildi. GS292, GS293 ve GS294 numaralı numunelerde çekirdekleşme katmanının oluşabilmesi için alttaş 350 °C'ye soğutuldu ve alttaş üzerine MEE (migration enhanced epitaxy) tekniği kullanılarak 10 ML Ga+P_2 büyütüldü. Daha sonra i-GaP tampon tabakası ve p-GaPN aktif tabakası büyütüldü. i-GaP kep tabakası ile büyütme süreçleri tamamlandı. Bu üç numune sırasıyla (110) düzlemine 2°, 4° ve 6'lik açıyla kesilmiş (100) yönelimli n-tipi Si alttaşlar üzerine büyütüldü. GS299 numunesinde SI-Si (100) alttaş üzerine MEE tekniği kullanılarak 10 ML Ga+P_2 büyütüldü. Daha sonra i-GaP tampon tabakası ve n-GaPN aktif tabakası büyütüldü. i-GaP kep tabakası ile büyütme süreçleri tamamlandı.



Şekil 4.2. Si alttaş üzerine büyütülen kalibrasyon numunelerinin büyütme diyagramları

Kalibrasyon Numunelerinin Karakterizasyonları

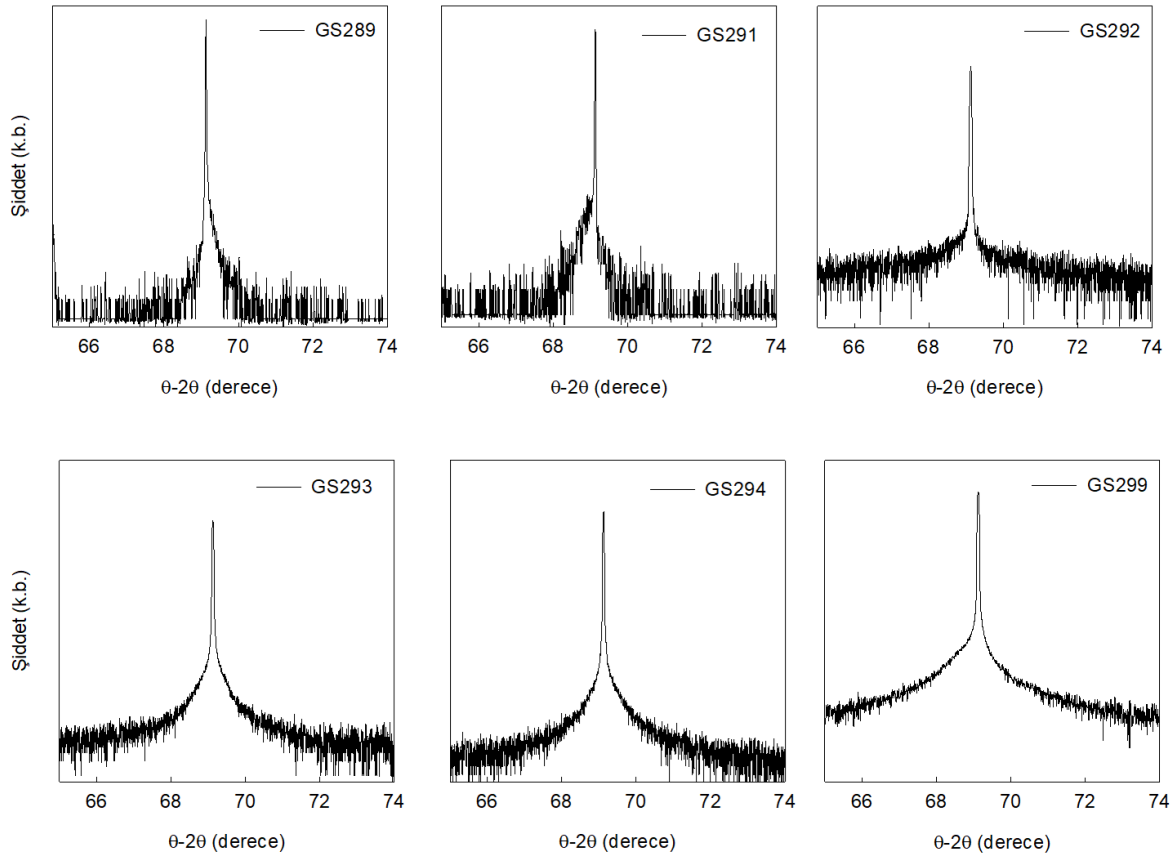
Hall Etkisi Ölçümleri: Bir yarıiletken numunenin Hall ölçümleri sonuçları, numunenin toplam taşıyıcı yoğunluğunu ve ortalama taşıyıcı hareketliliğini verir. Kalibrasyon örnekleri için büyütülecek tabakalarının mobilite ve taşıyıcı yoğunluğunu belirleyebilmek için özdirenç ölçümü ve Hall sabitleri ölçümleri yapıldı. Örneklerin özdirenç ölçümlerini yapmak için uygun bir teknik olan van der Pauw tekniği kullanıldı ve V_H Hall voltajının ölçülmesiyle katman taşıyıcı yoğunluğu elde edildi. Büyütülen kalibrasyon örneklerinin oda sıcaklığında taşıyıcı yoğunlukları, Hall katsayıları ve mobiliteleri Hall etkisi deneyleri ile elde edildi. Kalibrasyon numunelerinden bazılarının Hall etkisi deneyleri ile elde edilen parametreleri Tablo 4.1'de verildi.

Tablo 4.1. Kalibrasyon numunelerinin Hall ölçüm sonuçları

	Taşıyıcı Yoğunluğu (cm^{-3})	**Hall Katsayısı (cm^3/C)**	**Mobilite ($cm^2/V.s$)**
GS289	6.3078e+17	-9.8959	20496.00
GS293	1.6816e+18	+3.7121	2254.50

Hall ölçümlerinde GS289 numunesinin n-tipi ve GS293 numunesinin ise p-tipi taşıyıcı yoğunluğuna sahip olduğu görüldü. Büyütmede hedeflendiği gibi örneklerin taşıyıcı yoğunlukları E+17-E+18 cm^{-3} olarak elde edildi.

Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınımı (HRXRD) Ölçümleri:

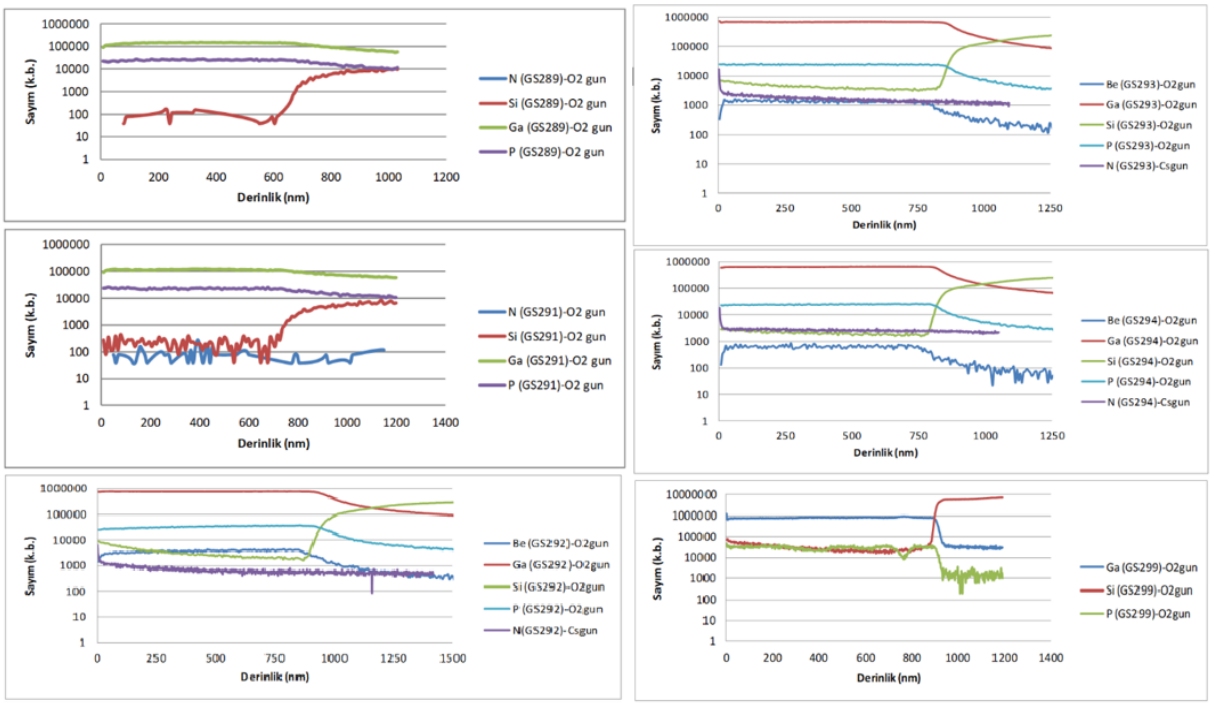


Şekil 4.3. Si alttaş üzerine büyütülen numunelerin HRXRD kırınım desenleri

Büyütülen örneklerin HRXRD θ-2θ kırınım desenleri Şekil 4.3'de verildi. Şekildeki yüksek şiddetli pik Si alttaştan ve Si alttaş pikinin solunda yer alan omuz ise GaPN katmanından kaynaklanan kırınım pikleridir. Numunelerdeki fosfor ve azot kompozisyon değerleri ($GaP_{1-x}N_x$) HRXRD ölçümleri sonucu LEPTOS simülasyon programı kullanılarak elde edilebilir. Ancak Şekil 4.3'den de görüldüğü gibi bu omuzlar simüle edilecek kadar iyi elde edilememiştir. Bu yüzden LEPTOS yazılımı kullanılarak simülasyonları yapılamamıştır.

İkincil İyon Kütle Spektrometresi (SIMS) Ölçümleri: İkincil iyon kütle spektroskopisi (SIMS), numuneleri birkaç keV enerjili odaklanmış birincil iyon ışını ile püskürtülüp, numunelerin yüzeyinden yayılan ikincil iyonları analiz ederek katı malzemeler hakkında elementel bilgi elde edinilmesini sağlayan yüzey analiz tekniğidir. SIMS ppm mertebelerinde elementel analiz

(kimyasal haritalama ve derinlik profili) yapabilen ultra yüksek vakum şartlarında çalışan hassas bir yüzey analiz tekniğidir. Cs ve O_2 iyon tabancaları mevcuttur. Kalibrasyon numunelerine ait SIMS derinlik profilleri Şekil 4.4'de verildi.

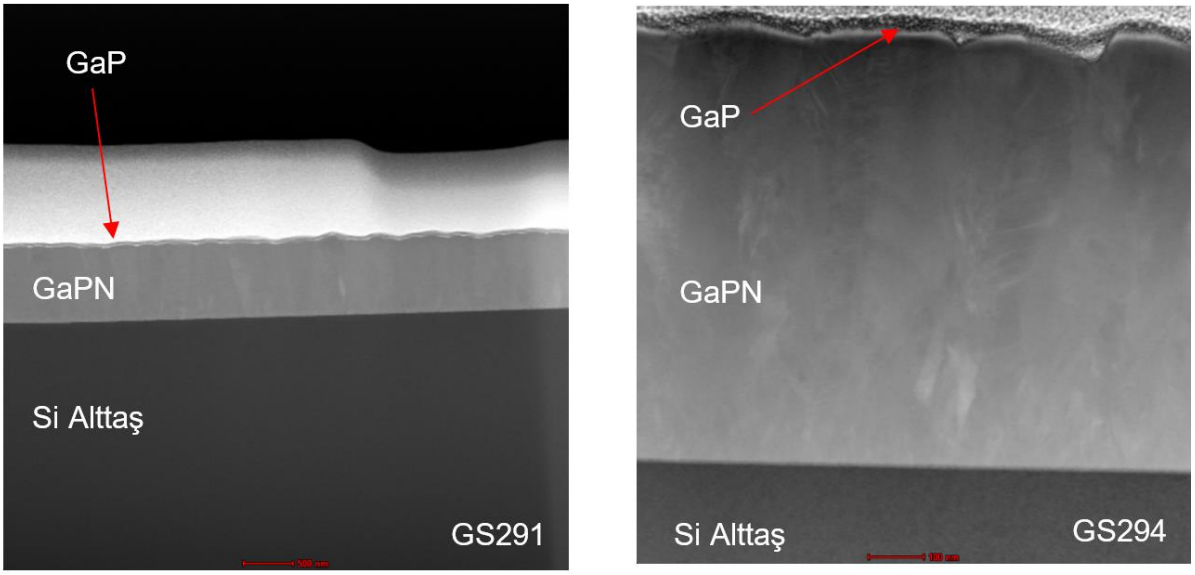


Şekil 4.4. Si alttaş üzerinde büyütülen kalibrasyon numunelerinin SIMS derinlik profilleri

Şekil 4.4'de verilen SIMS derinlik profilleri değerlendirildiğinde yapılardaki atomik türlerin her bir katman için düzgün bir dağılıma sahip olduğu görülmektedir. Bu ölçümlerde katkı olarak kullanılan Si (n-tipi) ve Be (p-tipi) atomik türlerinin varlığı iyi bir şekilde tespit edilmiştir. Bununla birlikte bazı örneklerde Cs tabanca ile yapılan ölçümlerde azotun varlığı ölçülmüş olmakla birlikte kesin bir değerlendirme yapacak dağılım elde edilememiştir. GS299 numaralı numunenin SIMS profilinde fosforun davranışında 800 nm civarında görülen düşmenin nedeni büyütmede MEE sürecini takiben alttaş sıcaklığının artırılmasında fosfor kaynağının kaynak kesicisinin kapalı olmasından kaynaklanmıştır. Bu büyütme sayesinde büyütme olmaksızın alttaş sıcaklığının artış süresince grup V (bu örnek için fosfor) akısının kesilmemesi gerekliliği anlaşılmaktadır. Bu etkiyi gözlemek için bu numune bir örnek olarak büyütülmüştür. Diğer büyütmelerde bu fosfor kesintisi uygulanmamıştır.

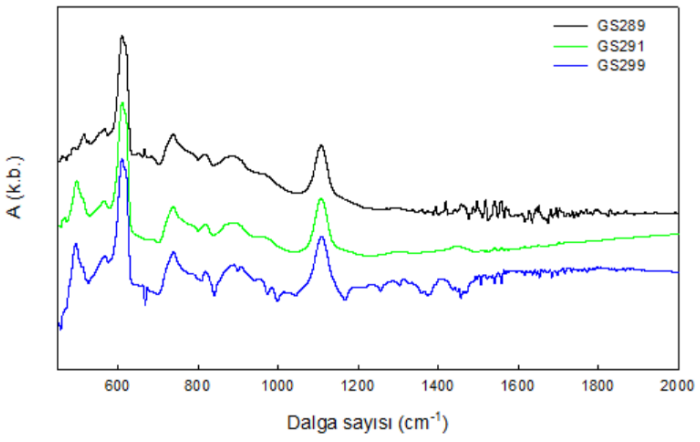
Bilindiği gibi, SIMS tekniği ile atomik yoğunluk değerlerini elde edebilmek için aynı yapının tüm atomik yoğunluk değerlerinin belirlenmiş olduğu referans numuneye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tür bir örnek temin edilemediğinden, SIMS analizlerinden sadece atomik dağılım hakkında bilgi edinilebilmiştir.

Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM, Transmission Electron Microscope) Ölçümleri: GS289-296 numunelerinin Geçirimli Elektron Mikroskop (TEM) ölçümleri Bilkent UNAM'da yapılmış, bunlar arasından örnek olarak GS291 ve GS294 numunelerinin kesit görüntüleri alındı. Bu örneklerde Si alttaş üzerine GaP tabakalarının büyümesini incelemek amacıyla (TEM) ile alınan görüntüler Şekil 4.5'de verildi. Bu görüntüler Si alttaş üzerine GaP ve GaPN yapısının büyütülmesinde arayüzeyinin düzgün olduğu görülmektedir.

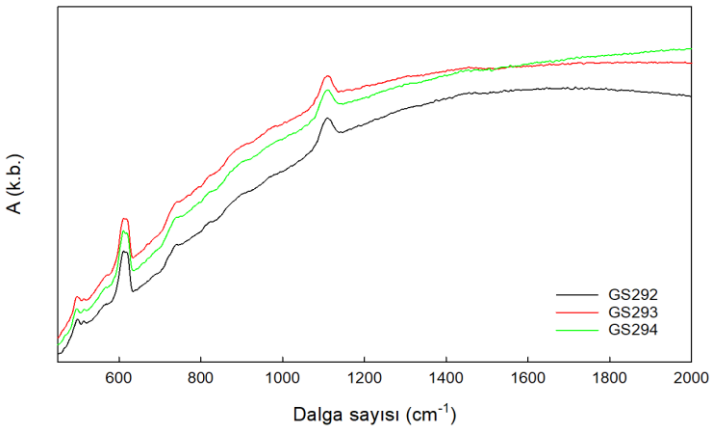


Şekil 4.5. GS291 ve GS294 numunelerinin X-TEM görüntüleri

Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Spektrometre Ölçümleri: Numunelerin kimyasal bağ analizleri Merkezimizde bulunan, çalışma aralığı 7500-370 cm^{-1} FTIR (Fourier Transform Infra Red), kırmızı altı spektroskopi sistemi ile gerçekleştirildi. Spektrometre hızlı kinetik tarama özelliğine sahiptir ve 4 cm^{-1} optik çözünürlükte ölçüm yapabilmektedir. Numunelerin FTIR spektrumları Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de verildi.



Şekil 4.6. GS289, GS291 ve GS299 numunelerinin soğurma (A) spektrumları



Şekil 4.7. GS292, GS293 ve GS294 numunelerinin soğurma (A) spektrumları

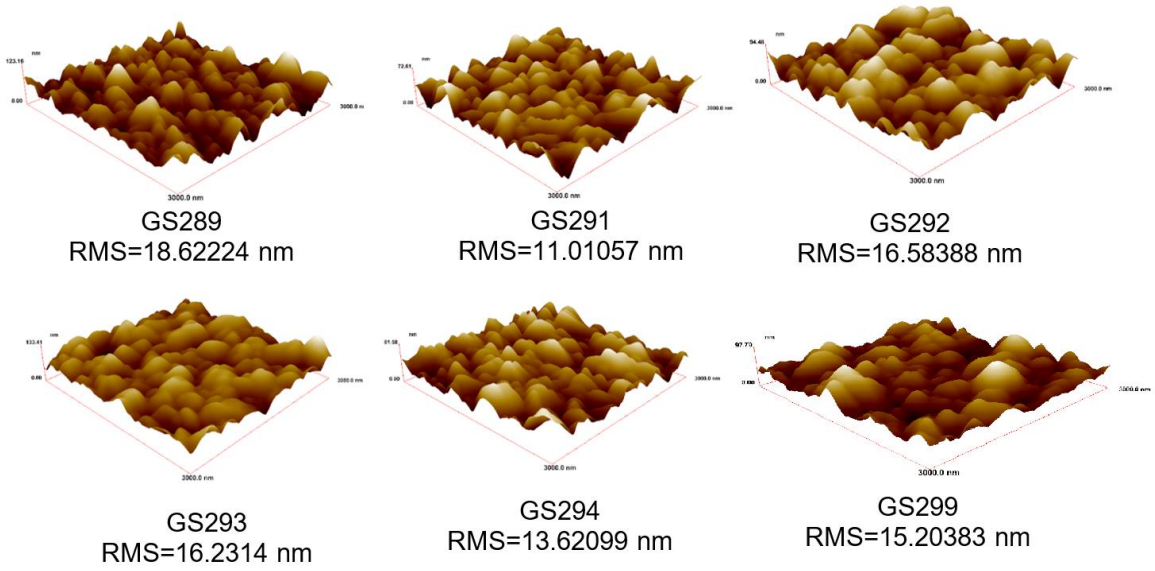
Tablo 4.2. Si alttaşlar üzerine büyütülen numuneler için elde edilen FTIR spektrumundan yapıdaki bağ analizi

Numune	(GaP:N) *	=Si-O =Si	C-Si **	=Si-O	=Si-N	Si-O-Si
GS289	-	611	738	817	885	1107
GS291	497	611	738	818	884	1108
GS299	495	611	738	818	890	1109
GS292	499	612	-	-	-	1110
GS293	498	612	-	-	-	1111
GS294	497	611	-	-	-	1111

Silikon (Si); Galyum (Ga); Fosfor (P); Nitrojen (N)
* (Thompson, 1971)
** (Misaelides, 1995), (Nalini R.P., 2011)
Verilen değerler cm^{-1} birimindedir.

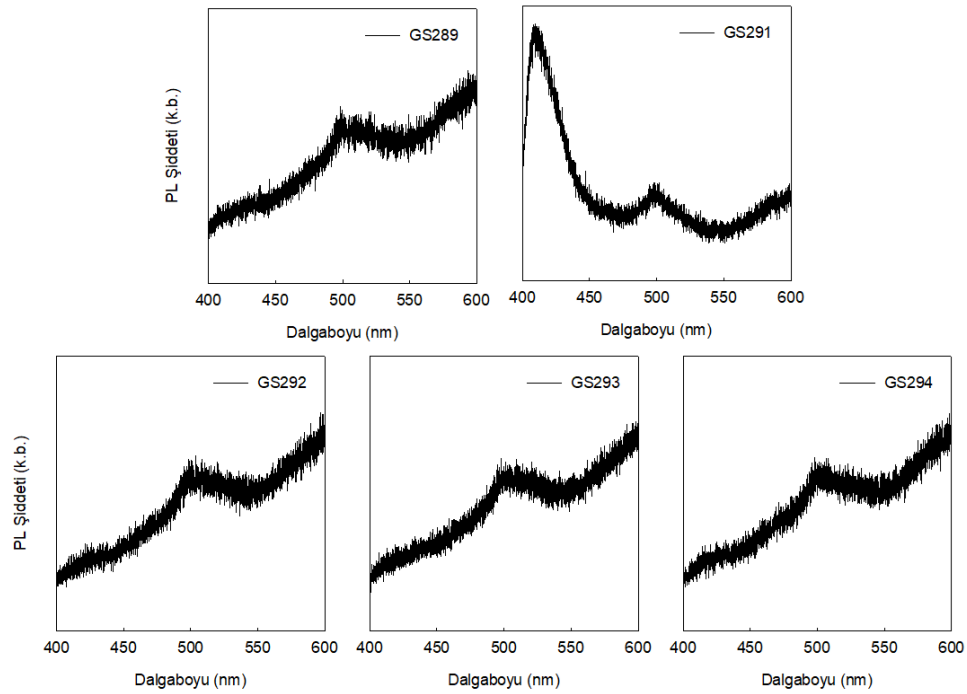
Bu şekiller incelendiğinde gözlenen piklerin bağ analizleri Tablo 4.2'de sunuldu. FTIR soğurma spektrumu yardımıyla SA yapısında As ve/veya P kenarına yerleşmiş olan azotun titreşim piki değerlendirilerek yapıdaki azotun kimyasal bağ durumu tartışıldı ve azotun yapıya girdiği sonucuna varıldı.

Atomik Kuvvet Mikroskopu (AFM) Ölçümleri: AFM yüzey morfolojisini belirlemede en yaygın uygulama alanına sahiptir. Büyütülen kalibrasyon numunelerin 3 μm x 3 μm AFM görüntüleri Şekil 4.8'de verildi. MBE'de farklı zamanlarda (farklı zamanlarda büyütmede, büyütme odasında ortam basıncında, kalıntı gaz basıncı ve türlerinde farklılaşma olabilmektedir) büyütülmesine rağmen yüzey pürüzlülükleri (RMS) birbirine yakın ve kabul edilebilir değerlerde olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.8. Si alttaş üzerine büyütülen kalibrasyon numunelerinin 3 μm x 3 μm AFM görüntüleri

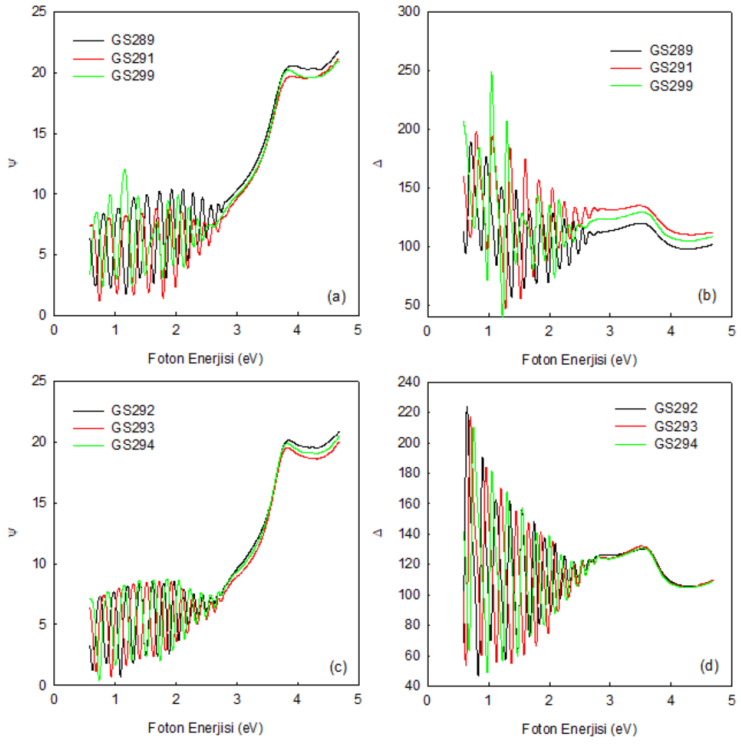
Fotolüminesans (PL) Ölçümleri: Örneğe zarar vermeyen bir ölçüm tekniğidir. Opto-elektronik malzemelerin fotolüminesans ölçümleri ile yapıların kuantum verimini etkileyen elektron-deşik çiftinin tüm birleşme mekanizmalarının değerlendirilmesi, elektronik yapılarının aydınlatılması, optik emisyon verimliliklerini değerlendirilmesi, bant aralıklarının belirlenmesi bu projede tanımlanan çalışma açısından birinci derecede önemlidir.

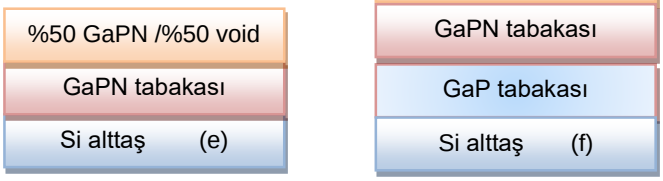


Şekil 4.9. Si alttaş üzerine büyütülen GS289, GS291, GS292, GS293 ve GS294 numunelerinin PL spektrumları

Si alttaş üzerine büyütülen yapıların PL spektrumları Şekil 4.9'da verildi. Şekil incelendiğinde tüm numunelerde PL pik pozisyonlarının yaklaşık 508 nm (2.4 eV), 569 nm (2.17 eV) bulunan piklerin sırasıyla GaP ve GaPN katmanlarına ait olduğu düşünülmektedir.

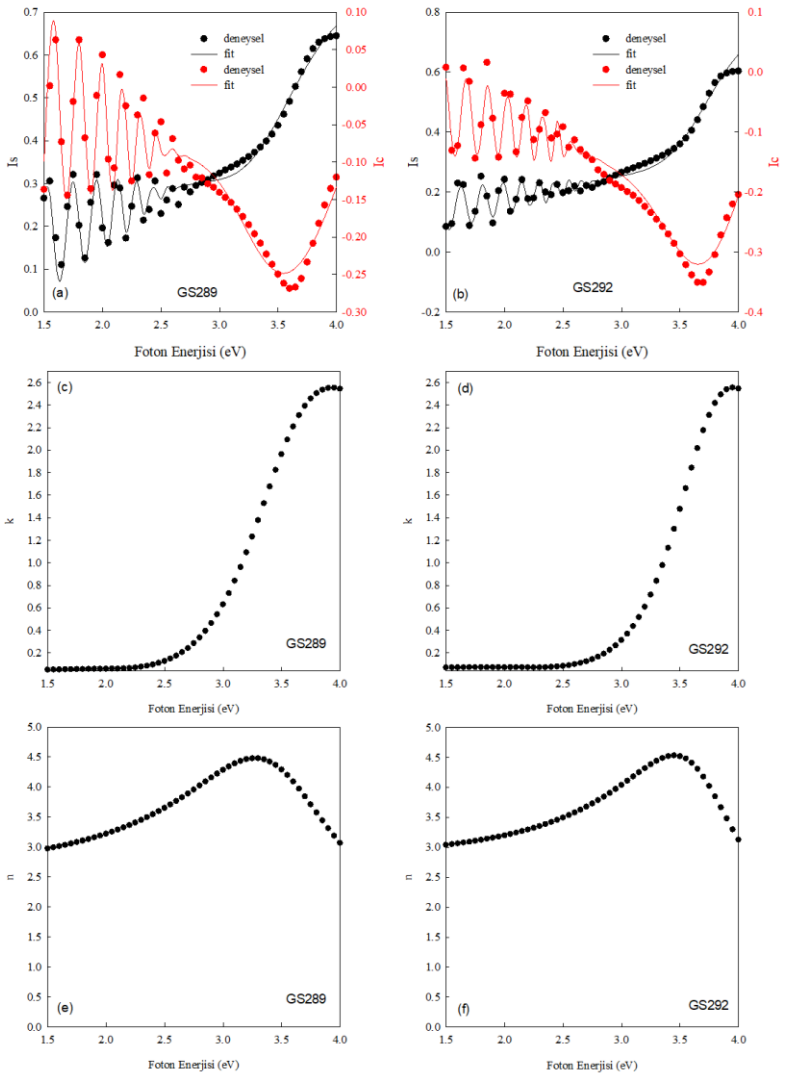
Spektroskopik Elipsometre (SE) Ölçümleri: Büyütülen yapıların, Spektroskopik Elipsometre sistemi kullanılarak yapılan ölçümleri sonucu elde edilen Ψ ve Δ elipsometrik parametrelerinin foton enerjisine göre değişimleri Şekil 4.10(a-d)'de sunuldu. Bu parametreler cinsinden tanımlanan I_s ve I_c parametreleri $I_s = \sin(2\Psi)\sin(\Delta)$ ve $I_c = \sin(2\Psi)\cos(\Delta)$ şeklinde tanımlanır. Birer örnek olarak GS289 ve GS292 numuneleri için Etkin Ortam yaklaşımı (Effective-Medium Approximation, EMA) kullanılarak ölçüm sonuçları modellendi. Modellemede ikili-tabaka (double-layer) ve üçlü-tabaka (triple-layer) kullanıldı. Bu katmanların şematik gösterimi Şekil 4.10(a) ve (b)'de sunuldu.





Şekil 4.10. GS289, GS291, GS299 numunelerinin ve GS292, GS293 ve GS294 numunelerinin Ψ (sırasıyla, a ve c) ve Δ (sırasıyla b ve d) elipsometrik parametrelerinin foton enerjisine göre değişimleri. (e) GS289 ve (f) GS292 numuneleri için modellemenin şematik gösterimi

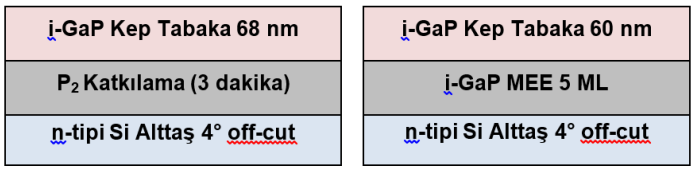
Numuneler için GaPN katmanı Adachi-New Forouhi dispersiyon bağıntısı ile modellendi. Modelleme Delta-Psi Yazılımı kullanılarak yapıldı ve GaPN tabakası için yasak enerji aralığı yaklaşık olarak GS289 numunesi için 2.05 eV ve GS292 için 2.18 eV olarak belirlendi. GS289 ve GS292 için modelleme sonuçları Şekil 4.11(a) ve (b)'de sunuldu ve deneysel veriler ile fit eğrilerinin uyumlu olduğu görüldü. Bu modelleme sonucunda elde edilen sönüm sabiti eğrileri Şekil 4.11(c) ve (d)'de; kırılma indisi eğrileri ise Şekil 4.11(e) ve (f)'de sunuldu. Sönüm sabitinin değerinin bant aralığının altındaki değerler için çok az olması yaklaşımı ile bant aralığı değerinin GS289 ve GS292 numuneleri için sırasıyla, 2.05 ve 2.18 eV olduğu görülür. Yasak enerji aralığının bu değerlerinin (her iki sistemin hata sınırları içinde) PL sonuçları ile uyumlu olduğu kabul edilebilir.



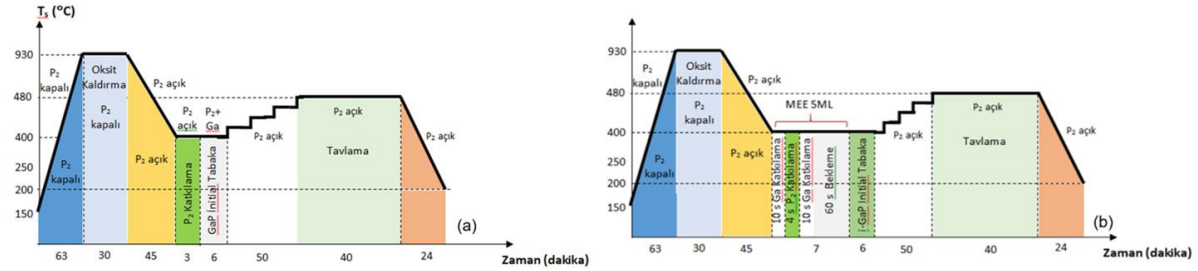
Şekil 4.11. (a) GS289 ve (b) GS292 numunelerinin Elipsometrik modelleme sonuçları (χ^2 değeri sırasıyla, 4.18 ve 4.28'dir). (c) GS289 ve (d) GS292 numunelerinin sönüm sabitlerinin (k) foton enerjisine göre değişimleri (e) GS289 ve (f) GS292 numunelerinin kırılma indislerinin (n) foton enerjisine göre değişimleri

GS300 ve GS301 Kalibrasyon Numunelerinin Büyütülmesi:

P_2 katkılama (çekirdekleştirici) ile Si alttaşlar üzerine büyütülen GS289, GS291; sırasıyla 2°,4° ve 6° n-tipi Si alttaş üzerine MEE tekniği ile büyütülen GS292, GS293, GS294 numunelerinin HRXRD analizi sonucunda GaP katmanı üzerindeki GaPN katmanına ait kırınım piklerinin, sağlıklı analiz edilebilecek nitelikte oluşmadığı görülmüştü. Bunun üzerine Si alttaşlar üzerine büyütmenin iyileştirilmesi amacıyla daha önce de kullandığımız iki farklı yöntem ile MBE sistemi kullanılarak (110) düzlemine 4°'lik açıyla kesilmiş (100) yönelimli Si alttaşlar üzerine GS300 ve GS301 olarak isimlendirilen iki kalibrasyon numunesi büyütüldü. Bu büyütmede, yukarıda bahsedilen problemin GaP katmanının oluşumundan kaynaklandığı düşünülerek, GaP katmanının Si üzerine büyütülmesinin optimize edilmesi hedeflendi.



Şekil 4.12. GS300 ve GS301 numunelerinin büyütülmesinin şematik gösterimleri



GS300 GS301

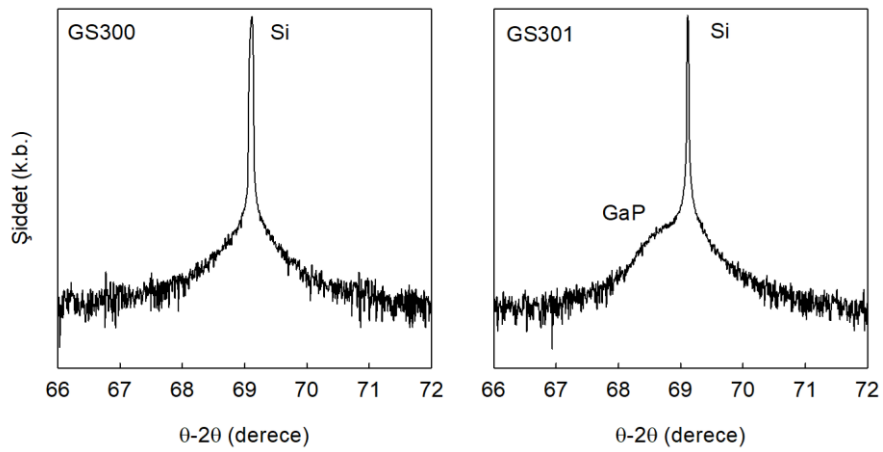
Şekil 4.13. (a) GS300 ve (b) GS301 numunelerinin büyüme diyagramları

GaP'ın Si üzerine düzgün büyütülmesinde kullanılan bu yöntemler, a) Si alttaş üzerine GaP büyütülmeden önce P_2 akısı gönderilmesi ile çekirdekleşme tabakası oluşturulması ve b) ardışık elementel demet akıları gönderilerek MEE (migration enhanced epitaxy) yöntemi ile tabaka oluşturulması yöntemleridir. GS300 numunesinde GaP'ın Si üzerine büyütülmesinde yüzeye belirli süre sadece P_2 akısı gönderilerek yüzeyde çekirdekleşme tabakası oluşturuldu. GS301 numunesinde ise alttaş yüzeyine MEE tekniği ile 5x(Ga/P_2) tabakasının büyütülmesi gerçekleştirildi. Bu iki yöntem ile oluşturulan tabakaların üzerine katkısız GaP katmanı 400 °C'de büyütüldü. Daha önceki büyütmelerden farklı olarak GaP katmanı büyütüldükten sonra, her iki numunenin P_2 akısı altında dakikada 1.6 °C adım-artımlı olarak 400 °C'den 480 °C'e

kadar alttaş sıcaklığı arttırıldı. Alttaş 480 °C'de 40 dakika tavlandı. GS300 ve GS301 yapılarının büyütülmelerinin şematik gösterimleri Şekil 4.12'de ve büyüme diyagramları Şekil 4.13'de verildi.

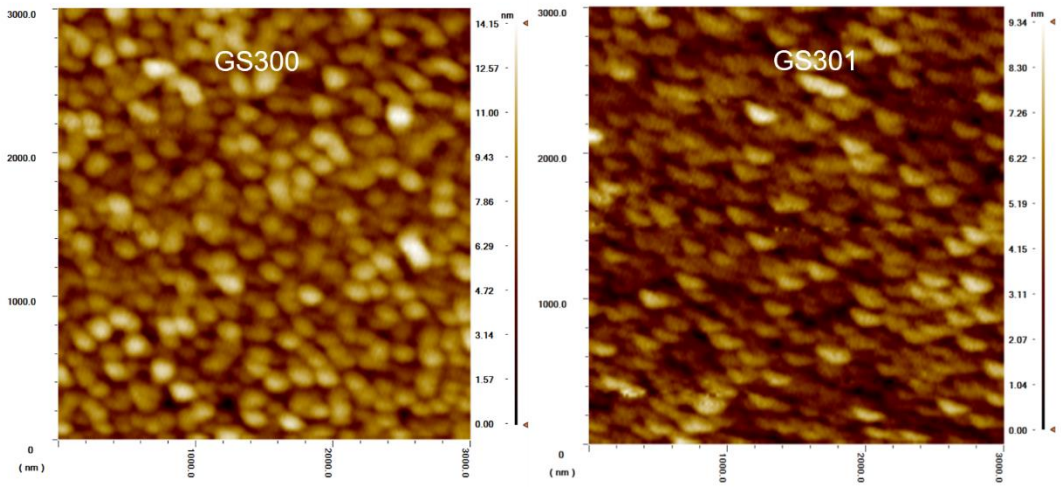
GS300 ve GS301 Kalibrasyon Numunelerinin Karakterizasyonları:

Büyütülen örneklerin HRXRD θ-2θ kırınım desenleri Şekil 4.14'de verildi. Şekildeki yüksek şiddetli pik Si alttaştan ve Si alttaş pikinin solunda yer alan omuz ise GaP katmanından kaynaklanan kırınım pikidir. GS301 numunesinin kırınım desenindeki GaP pikinin GS300'deki pike göre çok daha belirgin olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, MEE tekniği ile büyütülen GS301 numunesinin, sadece P_2 akısı gönderilerek yüzeyde çekirdekleşme tabakası oluşturularak büyütülen GS300 numunesine göre kristal kalitesinin daha iyi olduğu belirlendi.



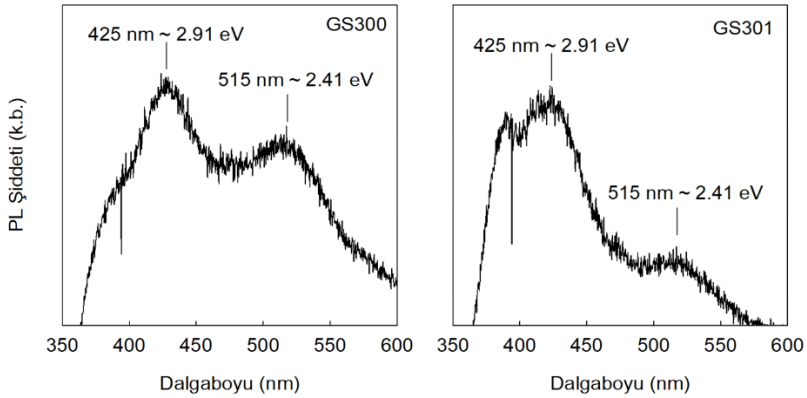
Şekil 4.14. GS300 ve GS301 numunelerinin HRXRD kırınım desenleri

Büyütülen numunelerin 3 μm × 3 μm AFM görüntüleri Şekil 4.15'de verildi. RMS değerlerinin GS300 ve GS301 numuneleri için sırasıyla 1.84 nm ve 1.38 nm olduğu belirlendi. MEE tekniği ile büyütülen GS301 numunesinin, sadece P_2 akısı gönderilerek yüzeyde çekirdekleşme tabakası oluşturularak büyütülen GS300 numunesine göre kristal kalitesinin daha iyi olduğu ve bu sonucun hem RMS değerine hem de AFM görüntüsüne yansıdığı belirlendi.

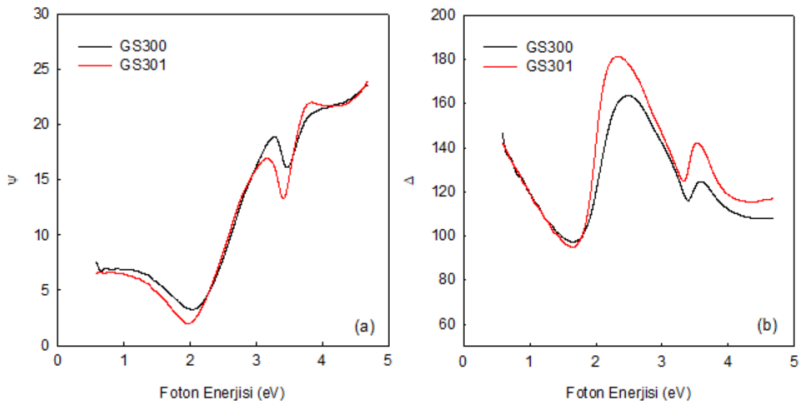


Şekil 4.15. GS300 ve GS301 numunelerinin 3 μm × 3 μm AFM görüntüleri

Si alttaş üzerine büyütülen yapıların PL spektrumları Şekil 4.16'da verildi. Şekil incelendiğinde yaklaşık 515 nm (2.41 eV), 425 nm (2.91 eV) bulunan piklerin GaP'ın pikleri olduğu düşünülmektedir.

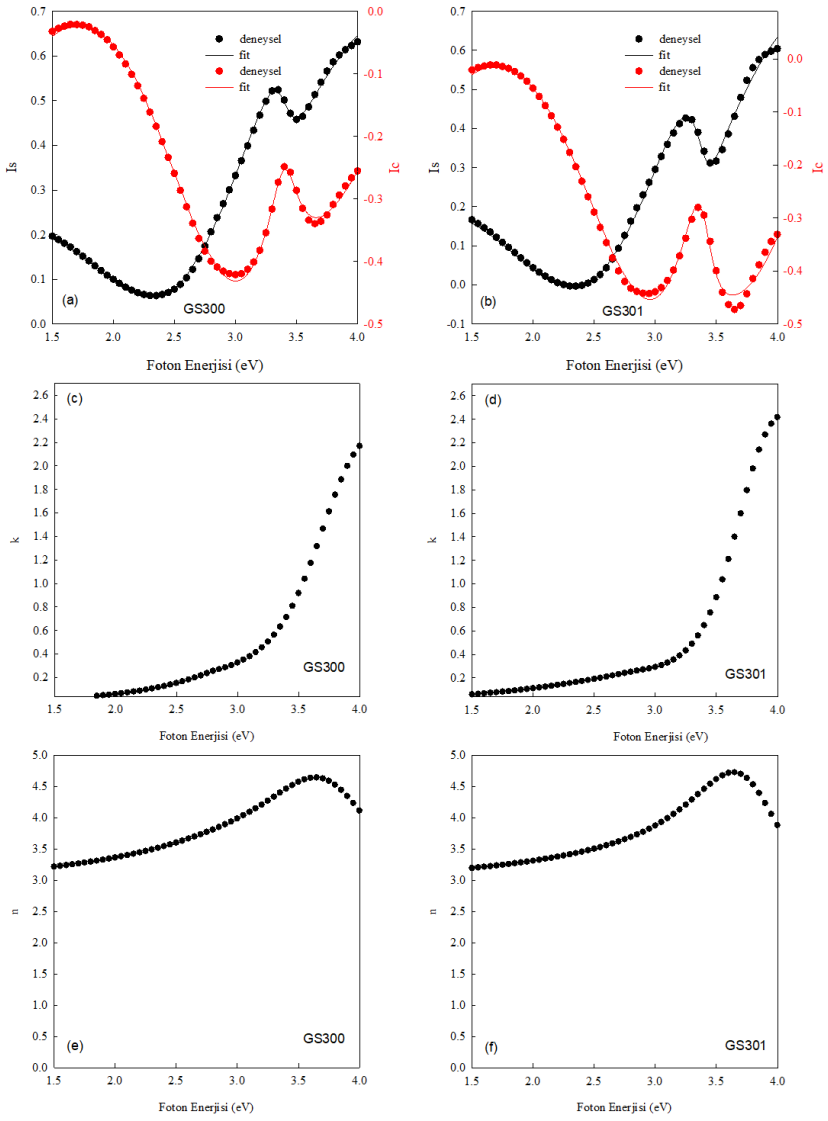


Şekil 4.16. GS300 ve GS301 numunelerinin PL spektrumları



Şekil 4.17. GS300 ve GS301 numunelerinin Ψ ve Δ elipsometrik parametrelerinin foton enerjisine göre değişimleri

Büyütülen yapıların Ψ ve Δ elipsometrik parametrelerinin foton enerjisine göre değişimleri Şekil 4.17'de sunuldu. Bu parametreler ile tanımlanan I_s ve I_c parametrelerinin foton enerjisine göre değişimleri ve Etkin Ortam yaklaşımı (Effective-Medium Approximation, EMA) kullanılarak ölçüm sonuçları modellendi.



Şekil 4.18. (a) GS300 ve (b) GS301 numunelerinin Elipsometrik modelleme sonuçları (χ^2 değeri sırasıyla, 0.29 ve 0.99'dur). (c) GS300 ve (d) GS301 numunelerinin sönüm sabitlerinin (k) foton enerjisine göre değişimleri (e) GS300 ve (f) GS301 numunelerinin kırılma indislerinin (n) foton enerjisine göre değişimleri

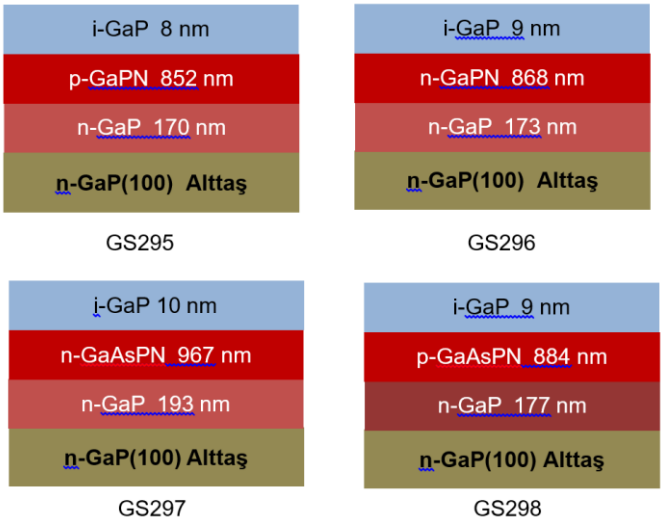
Her iki numune için GaP katmanı Adachi-New Forouhi dispersiyon bağıntısı ile Delta-Psi Yazılımı kullanılarak modelleme yapıldı. GaP tabakası için yasak enerji aralığı yaklaşık olarak GS300 numunesi için 2.80 eV ve GS301 için 2.85 eV olarak belirlendi. GS300 ve GS301 için modelleme sonuçları Şekil 4.18(a) ve (b)'de sunuldu ve deneysel veriler ile fit eğrilerinin uyumlu

olduğu görüldü. Bu modelleme sonucunda elde edilen sönüm sabiti eğrileri Şekil 4.18(c) ve (d)'de; kırılma indisi eğrileri ise Şekil 4.18(e) ve (f)'de sunuldu. Modelleme sonucu elde edilen yasak enerji aralığı değerlerinin (her iki sistemin hata sınırları içinde) PL sonuçları ile uyumlu olduğu kabul edilebilir.

4.1.2 GaP alttaşlar üzerine kalibrasyon numunelerinin büyütülmesi ve karakterizasyonları

Kalibrasyon Numunelerinin Büyütülmesi

GaP alttaş üzerine büyütülen kalibrasyon numunelerinin şematik gösterimi Şekil 4.19'da verildi.

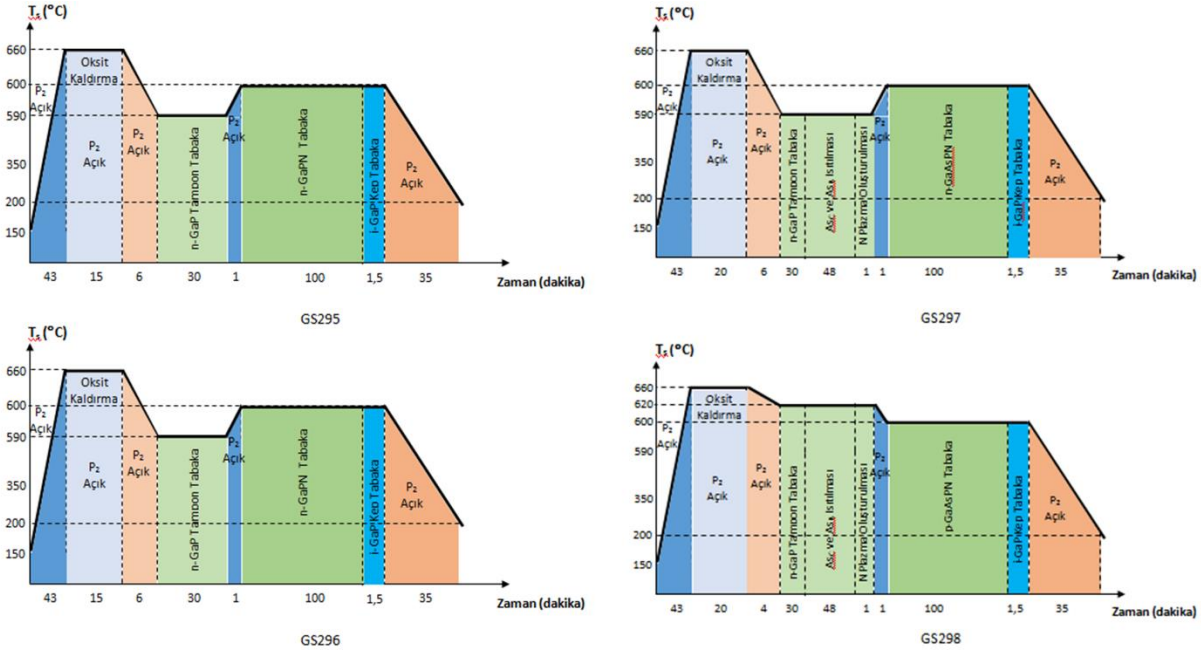


Şekil 4.19. GaP alttaş üzerine büyütülen kalibrasyon numunelerinin şematik gösterimi

GS295-GS298 numuneleri için kullanılan GaP alttaşlar MBE'de hızlı yükleme odasına (FEL) konarak büyütme aşamaları gerçekleştirildi: FEL'e konan alttaş uygun vakum değerine (~1.0E-8-1.0E-9 mbar) ulaştıktan sonra hazırlık odasına alındı; su ve buharlaşabilen kirliliklerden arındırmak amacıyla 350 °C'de 1.5 saat ısıtıldı. Daha sonra 200 °C'ye soğutulan alttaşlar uygun vakum değeri sağlandıktan sonra büyütme odasına transfer edildi. Kalibrasyon örneklerinin büyüme diyagramları Şekil 4.20'de verildi.

Manipülatöre yerleştirilen GaP alttaşlar 660 °C'ye kadar ısıtılarak yüzeylerinden oksitin uzaklaştırılması sağlandı ve tek kristal yapının ortaya çıktığı ve yüzeyin oksitten arındırıldığı RHEED ile gözlendi. Şekil 4.20'de sunulan büyütme tasarımı kullanılarak diğer tabakalar büyütüldü. GS295 ve GS296 numaralı numunelerde (100) n-tipi GaP alttaşlar üzerine n-GaP tampon tabakası büyütüldü. Daha sonra GS295'de p-GaPN ve GS296'da n-GaPN aktif

tabakaları büyütülerek büyütme i-GaP kep tabaka ile tamamlandı. GS297 ve GS298 numunelerinde (100) n-tipi GaP alttaşlar üzerine n-GaP tampon tabakası büyütüldü. Daha sonra GS297'de n-GaAsPN ve GS298'de p-GaAsPN aktif tabakaları büyütülerek büyütme i-GaP kep tabaka ile tamamlandı. Büyüme tamamlandıktan sonra, yüzeyden muhtemel P_2 ayrılmalarını önlemek amacıyla P_2 akısı altında alttaş sıcaklığı 250 °C'ye düşürüldü ve örnek sistemden dışarıya 150 °C'de iken transfer edildi.



Şekil 4.20. GaP alttaş üzerine büyütülen kalibrasyon numunelerinin büyütme diyagramları

Kalibrasyon Numunelerinin Karakterizasyonları

Hall Etkisi Ölçümleri: Büyütülecek tabakalarının mobilite ve taşıyıcı yoğunluğunu belirleyebilmek için özdirenç ölçümü ve Hall sabitleri ölçümleri yapıldı. Örneklerin özdirenç ölçümlerini yapmak için uygun bir teknik olan van der Pauw tekniği kullanıldı ve V_H Hall voltajının ölçülmesiyle katman taşıyıcı yoğunluğu elde edildi. Büyütülen kalibrasyon örneklerinin oda sıcaklığında taşıyıcı yoğunlukları, Hall katsayıları ve mobiliteleri Hall etkisi deneyleri ile elde edildi. Kalibrasyon numunelerinden bazılarının Hall etkisi deneyleri ile elde edilen parametreleri Tablo 4.3'de verildi.

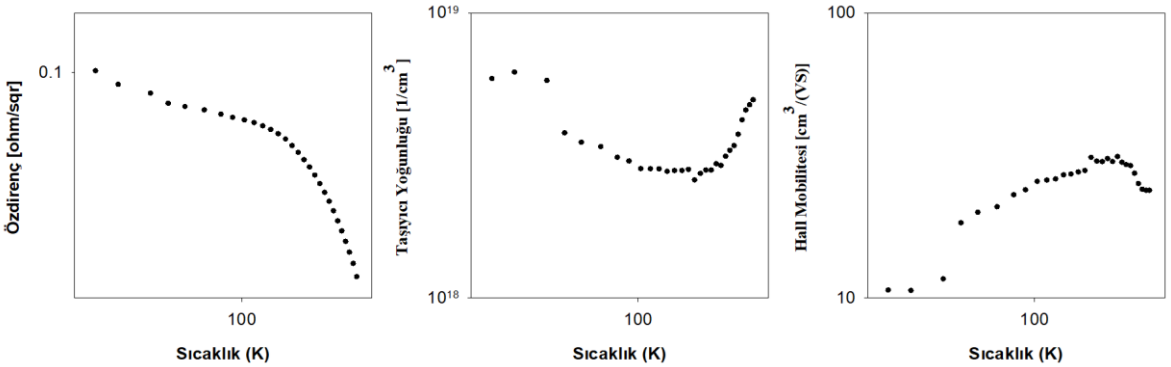
Tablo 4.3. GaP alttaş üzerine büyütülen kalibrasyon numunelerinin Hall ölçüm sonuçları

	Taşıyıcı Yoğunluğu (cm^{-3})	Hall Katsayısı (cm^3/C)	Mobilite ($cm^2/V.s$)
GS295	4.9385e+18	+1.2640	23.78
GS298	2.2400e+18	+2.7867	120.81

Hall ölçümlerinde numunelerin p-tipi taşıyıcı yoğunluğuna sahip olduğu görüldü. Büyütmede

hedeflendiği gibi örneklerin taşıyıcı yoğunlukları E+17-E+18 cm^{-3} olarak elde edildi. Bu değerler ileride büyüteceğimiz LED yapılarında katkı değerlerinin oturtulmasında kullanılabilir büyüklüktedir.

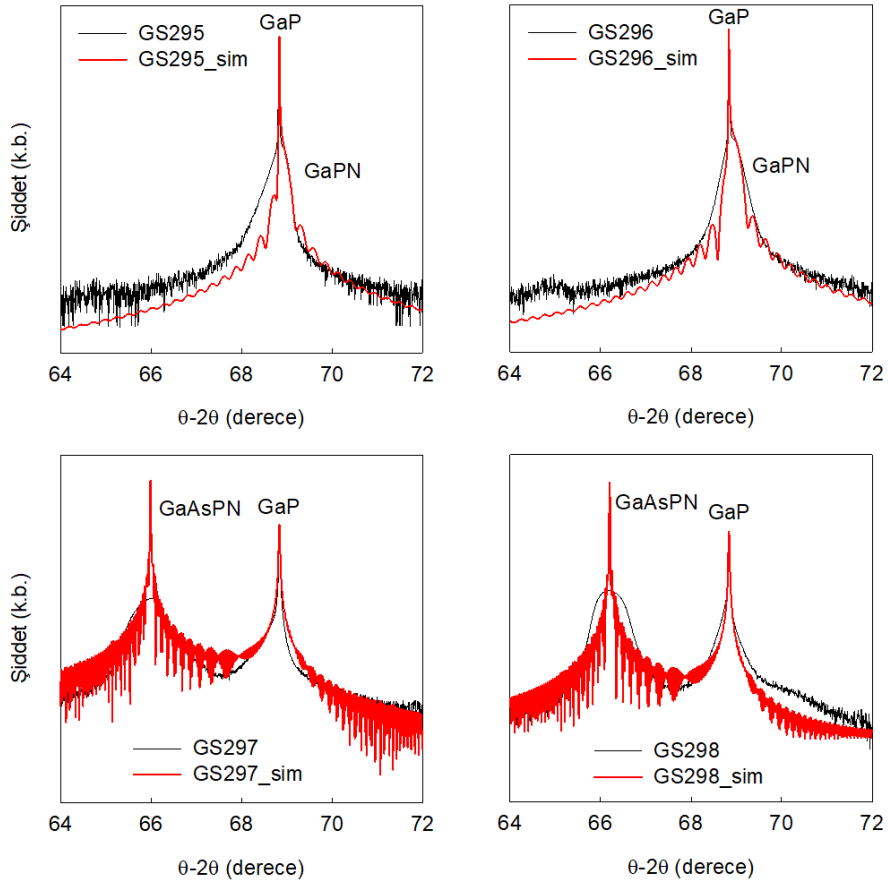
Ayrıca, büyütülen numunelerden GS295 için özdirenç, taşıyıcı yoğunluğu ve taşıyıcı hareketliliği (mobilite) Hall Etkisi deneyleri ile sıcaklığa bağlı (~25-300K) olarak belirlendi (Şekil 4.21). GS295 numunesinin sıcaklık bağımlı taşıyıcı yoğunlukları incelendiğinde, yapıların yarıiletken davranış sergilediği, yapılardaki kusurluluklardan kaynaklı saçılmalarının mobiliteyi azalttığı düşünülmektedir.



Şekil 4.21. GS295 numunesinin elektriksel özellikleri

Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınımı (HRXRD) Ölçümleri: Büyütülen örneklerin HRXRD θ-2θ kırınım desenleri Şekil 4.22'de verildi. Kırınım desenlerindeki yüksek şiddetli pikler GaP alttaştan kaynaklanan kırınım pikleridir. Numunelerdeki fosfor ve azot kompozisyon değerleri ($GaP_{1-x}N_x$) HRXRD ölçümleri sonucu LEPTOS simülasyon programı kullanılarak elde edilebilir. Şekil 4.22'de görüldüğü gibi GaP alttaş üzerine büyütülen numunelerin pikleri daha belirgin çıkmış ve bunlara simülasyon uygulanmıştır. GS295 ve GS296 numunelerinin kırınım desenlerinde yüksek şiddetli pik GaP alttaştan ve GaP alttaş pikinin sağında yer alan omuz ise GaPN katmanından kaynaklanan kırınım pikleridir. Bu kırınım desenlerine simülasyon uygulanmış ve azot oranı yaklaşık % 0.4 olarak elde edilmiştir (fosfor oranı %99.6'dır).

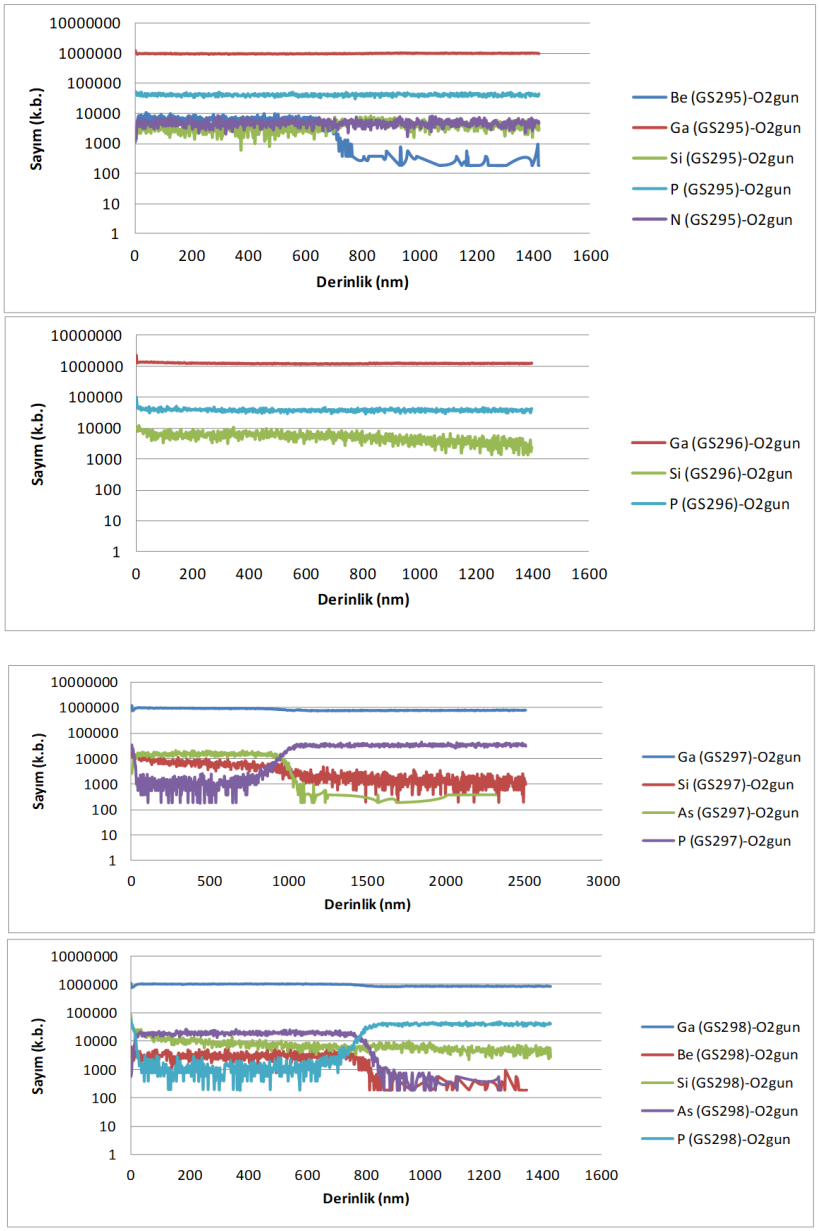
GS297 ve GS298 örneklerine ait olan kırınım desenlerinde soldaki pik $GaAs_yP_{1-x-y}N_x$ katmanına, sağdaki pik ise GaP'a aittir. Bu numunelerin kırınım desenlerine simülasyon uygulandığında sırasıyla As oranı (y) %56 ve %54 olarak tespit edilmiştir. Azot oranı x ise % 0.4 ve % 0.5 olarak belirlendi. Yapılan analizi sonucunda yapılara seyreltik azot girmesinin başarıldığı görüldü.



Şekil 4.22. GaP alttaş üzerine büyütülen numunelerin HRXRD kırınım desenleri

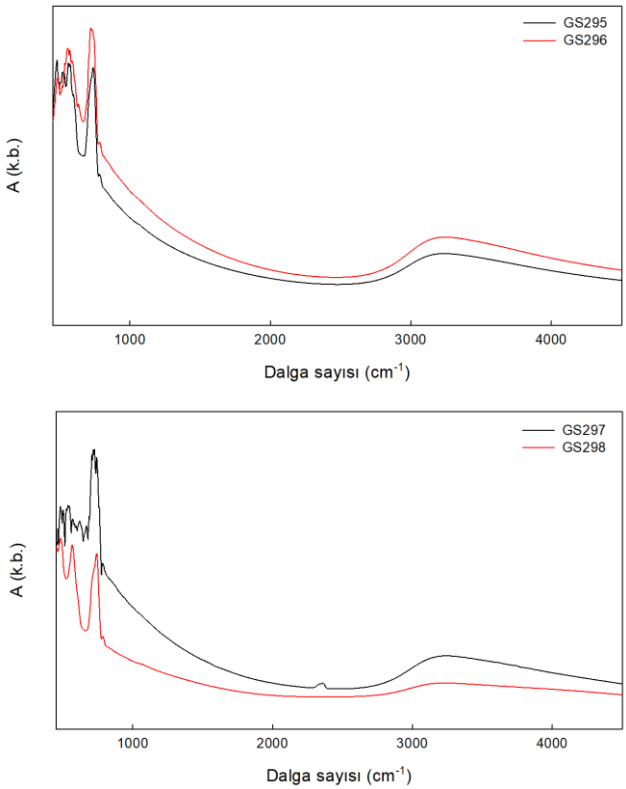
Numunelerde kusur (dislokasyon) yoğunlukları (δ) HRXRD verileri ve $\delta = 1/D^2$ ve $D = 0.9\lambda/\beta cos\theta$ eşitlikleri kullanılarak hesaplanabilir. Burada, λ X-ışınının dalgaboyu, θ pik açısı ve β pikin pik yarı genişliğidir (FWHM). GS297 ve GS298 numuneleri için HRXRD sonuçlarından elde edilen pik açıları ve pik yarı genişlikleri kullanılarak kusur (dislokasyon) yoğunlukları sırasıyla 3.13×10^{-9} ve 1.92×10^{-9} cm^{-2} olarak hesaplandı ve bu değerler kabul edilebilir düzeyde oldukları görüldü.

İkincil İyon Kütle Spektrometresi (SIMS) Ölçümleri: Kalibrasyon numunelerine ait SIMS derinlik profilleri Şekil 4.23'de verildi. Şekilde verilen SIMS derinlik profilleri değerlendirildiğinde yapılardaki atomik türlerin her bir katman için düzgün bir dağılıma sahip olduğu görülmektedir. Bu ölçümlerde katkı olarak kullanılan Si (n-tipi) ve Be (p-tipi) atomik türlerinin varlığı iyi bir şekilde tespit edilmiştir. Bununla birlikte bazı örneklerde Cs tabanca ile yapılan ölçümlerde azotun varlığı ölçülmüş olmakla birlikte kesin bir değerlendirme yapacak dağılım elde edilememiştir. XRD değerlendirilmesinde varlığı tespit edilmiş olmasına rağmen, SIMS ölçümlerinde (örneğin, GS297 ve GS298) azotun varlığı tam olarak değerlendirilememiştir.



Şekil 4.23. GS295, GS296, GS297 ve GS298 numunelerinin SIMS derinlik profilleri

Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Spektrometre Ölçümleri: Numunelerin kimyasal bağ analizleri Merkezimizde bulunan, çalışma aralığı 7500-370 cm^{-1} FTIR (Fourier Transform Infra Red), kırmızı altı spektroskopi sistemi ile gerçekleştirildi. Spektrometre hızlı kinetik tarama özelliğine sahiptir ve 4 cm^{-1} optik çözünürlükte ölçüm yapabilmektedir. Numunelerin FTIR spektrumları Şekil 4.24'de verildi.



Şekil 4.24. GS295, GS296, GS297 ve GS298 numunelerinin soğurma (A) spektrumları

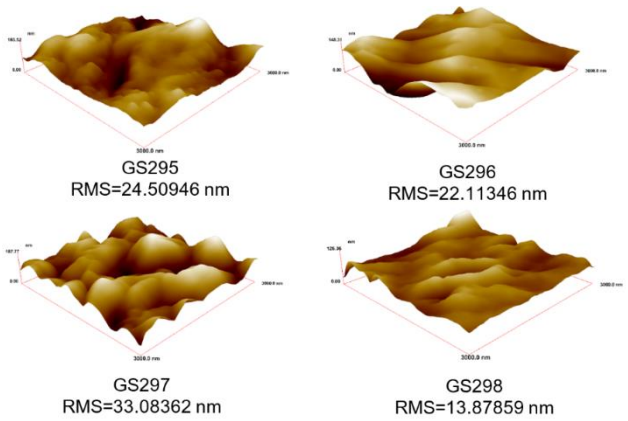
Tablo 4.4. GaP alttaşlar üzerine büyütülen numuneler için elde edilen FTIR spektrumundan yapıdaki bağ analizi

Numune	(GaP:N) *	C-Si **	=N-H stretch
GS295	481	739	3249
GS296	490	722	3248
GS297	461	727	3252
GS298	482	741	3227
Galyum (Ga); Fosfor (P); Nitrojen (N); Arsenik (As) *(Thompson, 1971) **(Misaelides, 1995), (Nalini R.P., 2011) Verilen değerler cm^{-1} birimindedir.			

Bu şekiller incelendiğinde gözlenen piklerin bağ analizleri Tablo 4.4'de sunuldu. FTIR soğurma spektrumu yardımıyla SA yapısında As ve/veya P kenarına yerleşmiş olan azotun titreşim piki değerlendirilerek yapıdaki azotun kimyasal bağ durumu tartışıldı ve azotun yapıya girdiği sonucuna varıldı.

Atomik Kuvvet Mikroskopu (AFM) Ölçümleri: Büyütülen numunelerin 3 μm x 3 μm AFM görüntüleri Şekil 4.25'de verildi ve RMS değerlerinin kabul edilebilir değerlerde olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, bazı numunelerin RMS değerlerinin diğerlerine göre büyük olduğu görülmektedir. Örneğin, GS297'nin RMS değeri 33.08 nm iken GS298'inki 13.88 nm

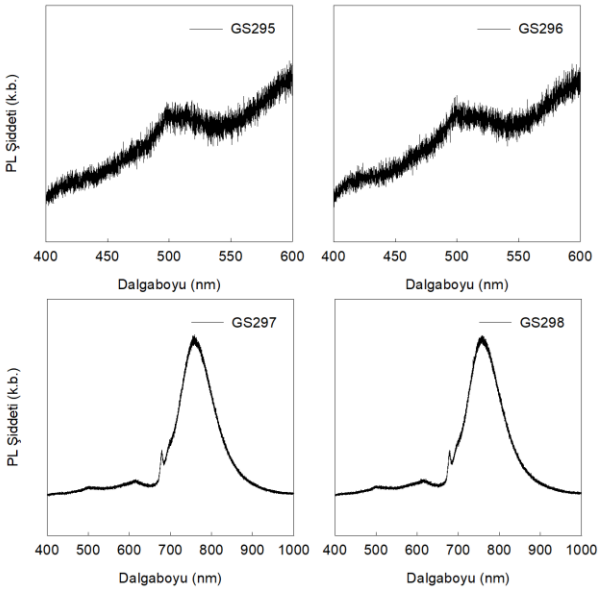
olarak ölçülmüştür. Bu farklılığın, XRD analizlerinde belirlenen GS297 numunesinin diğerine göre daha fazla kusur yoğunluğuna sahip olması ile açıklanabilir. Belirlenen büyütme şartları her iki numune için aynı olmasına rağmen kusur yoğunluklarının farklı oluşu, numunelerin farklı zamanlarda büyütülmesi ve bu nedenle büyütme odasındaki fiziksel şartlara bağlı olabileceği ile ilişkilendirildi.



Şekil 4.25. Büyütülen numunelerin 3 μm x 3 μm AFM görüntüleri

Fotolüminesans (PL) Ölçümleri:

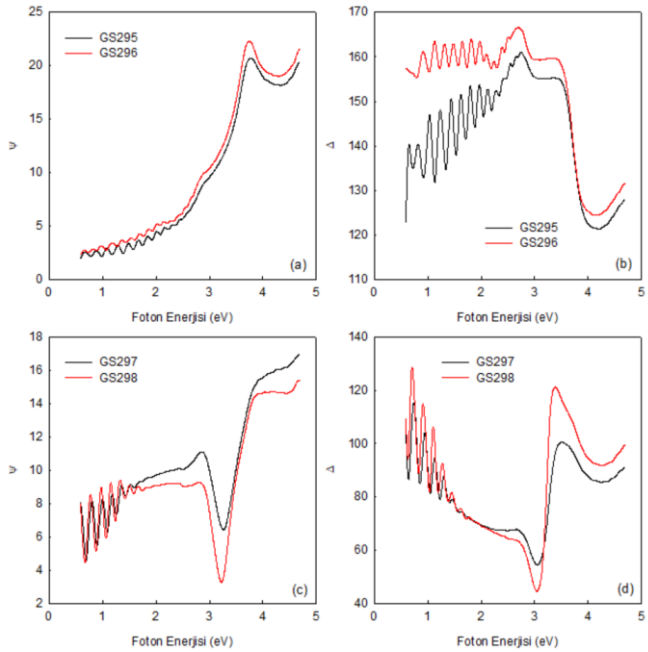
GaP alttaş üzerine büyütülen kalibrasyon numunelerinin PL spektrumları Şekil 4.26'da verildi. GS295 ve GS296 numunelerinde yaklaşık 508 nm (2.4 eV), 569 nm (2.17 eV) bulunan piklerin sırasıyla GaP ve GaPN katmanlarına ait olduğu düşünülmektedir. GS297 ve GS298 numunelerinde yaklaşık 760 nm'de (1.63 eV) gözlenen PL pikinin GaAsPN (THANH, 2012), 610 nm'deki (2.03 eV) pikin GaPN, 508 nm'deki (2.4 eV) pikin GaP katmanlarından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.26. GS295, GS296, GS297 ve GS298 numunelerinin PL spektrumları

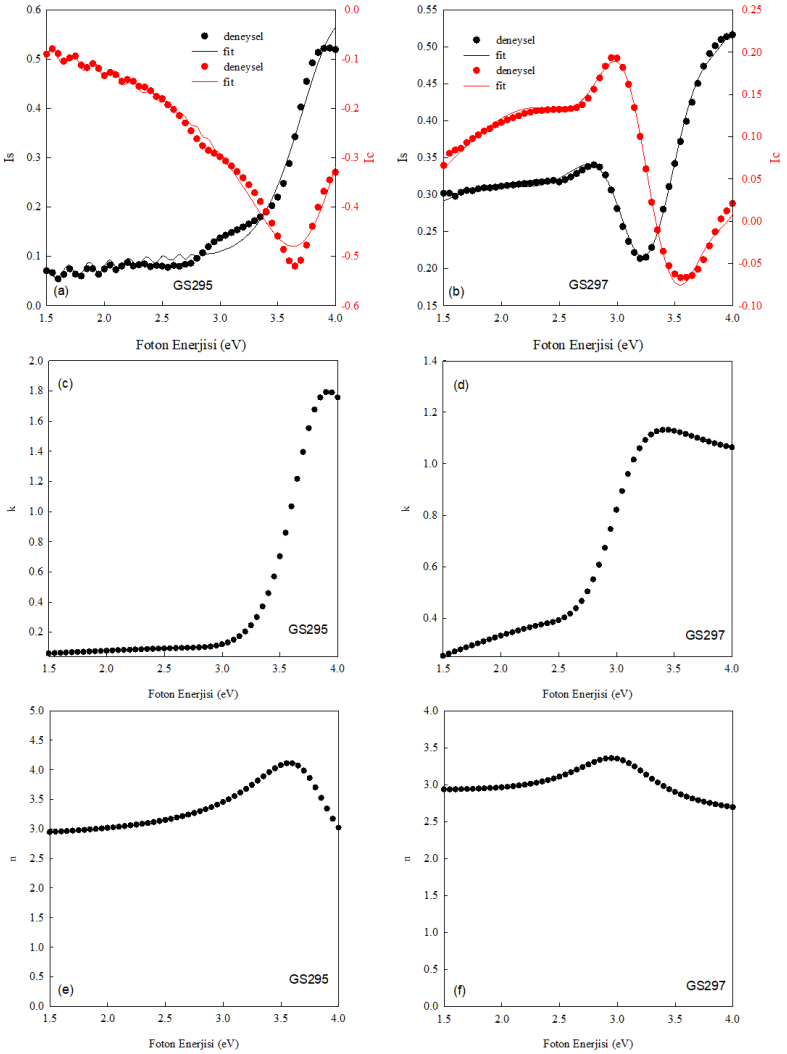
Spektroskopik Elipsometre (SE) Ölçümleri: GaP alttaşlar üzerine büyütülen yapıların, SE ölçümleri sonucu elde edilen Ψ ve Δ elipsometrik parametrelerinin foton enerjisine göre değişimleri Şekil 4.27'de sunuldu.

I_s ve I_c parametreleri kullanılarak GS295 ve GS297 numuneleri için Etkin Ortam yaklaşımı (Effective-Medium Approximation, EMA) kullanılarak ölçüm sonuçları modellendi. Modellemede üçlü-tabaka ve dörtlü-tabaka kullanıldı.



Şekil 4.27. (a) GS295 ve GS296 , (b) GS297 ve GS298 numunelerinin Ψ ve Δ elipsometrik parametrelerinin foton enerjisine göre değişimleri

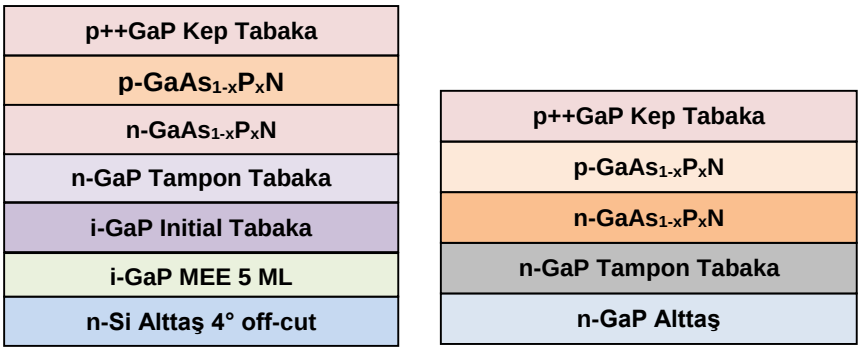
Numuneler için GaPN ve GaAsPN katmanı Adachi-New Forouhi dispersiyon bağıntısı ile modellendi. Modelleme Delta-Psi yazılımı kullanılarak yapıldı ve GS295 numunesinde GaPN tabakası için yasak enerji aralığı yaklaşık olarak 2.16 eV ve GS297 numunesinde GaAsPN tabakası 1.75 eV olarak belirlendi. Elde edilen bu sonuçlar PL ile elde edilen sonuçlarla (her iki sistemin hata sınırları içinde) birbiri ile uyumlu olduğu kabul edilebilir. GS295 ve GS297 için modelleme sonuçları Şekil 4.28(a) ve (b)'de sunuldu ve deneysel veriler ile fit eğrilerinin uyumlu olduğu görüldü. Bu modelleme sonucunda elde edilen sönüm sabiti eğrileri Şekil 4.28(c) ve (d)'de; kırılma indisinin foton enerjisine göre değişimleri ise Şekil 4.28(e) ve (f)'de verildi.



Şekil 4.28. (a) GS295 ve (b) GS297 numunelerinin Elipsometrik modelleme sonuçları (χ^2 değeri sırasıyla, 2.48 ve 0.32'dir). (c) GS295 ve (c) GS297 numunelerinin sönüm sabitlerinin (k) foton enerjisine göre değişimleri (e) GS295 ve (f) GS297 numunelerinin kırılma indislerinin (n) foton enerjisine göre değişimleri

4.2 Seyreltik Azotlu Tek-Renkli GaAsPN LED Yapılarının Büyütülmesi ve Analizleri

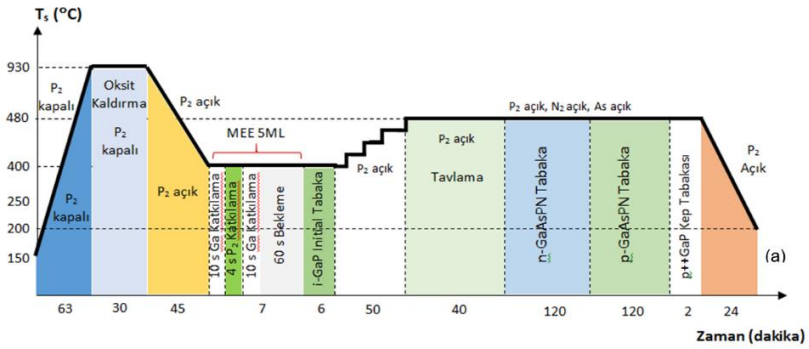
Kalibrasyon numunelerinin büyütülmesi ve analizlerinin ardından seyreltik azotlu tek-renkli GaAsPN LED yapıları GaP ve Si alttaşlar üzerine MBE yöntemi ile büyütüldü. GS303 ve GS304 olarak isimlendirilen Si ve GaP alttaş üzerine büyütülen tek-renkli GaAsPN p-n eklem LED yapılarının şematik gösterimi Şekil 4.29'da verildi.



Şekil 4.29. GS303 ve GS304 numunelerinin büyütülmesinin şematik gösterimleri

4.2.1 Seyreltik azotlu tek-renkli GaAsPN LED yapılarının Si alttaşlar üzerine büyütülmesi ve karakterizasyonları

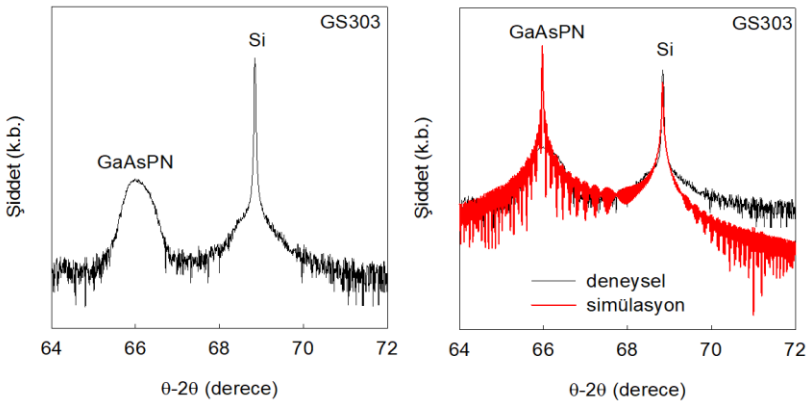
Seyreltik azotlu tek-renkli GaAsPN LED yapısı Si alttaş üzerine Şekil 4.30'daki tasarımla büyütüldü. GS301'in büyütülme parametreleri referans alınarak GS303 numunesi MBE sistemi ile (110) düzlemine 4°'lik açıyla kesilmiş (100) yönelimli Si alttaş üzerine MEE tekniği ile 5x(Ga/P_2) tabakasının büyütülmesi gerçekleştirildi. Bu yöntem ile oluşturulan tabakanın üzerine katkısız GaP katmanı 400 °C'de büyütüldü. Daha sonra, P_2 akısı altında dakikada 1.6 °C adım-artımlı olarak 400 °C'den 480 °C'e kadar alttaş sıcaklığı arttırıldı. Alttaş 480 °C'de 40 dakika tavlandı. Bu işlemden sonra n-tipi ve sonra p-tipi GaAsPN tabakaları büyütüldü. Büyütme aşırı katkılı p++GaP kep tabakasının büyütülmesi ile tamamlandı. GS303 numunesinin büyütme diyagramı Şekil 4.30'da verildi.



Şekil 4.30. GS303 numunesinin büyüme diyagramı

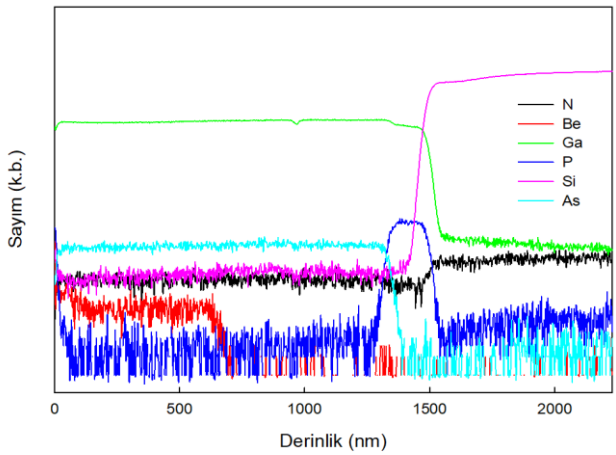
Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınımı (HRXRD) Ölçümleri: GS303 numunesinin HRXRD θ-2θ kırınım desenleri Şekil 4.31'de verildi. Numunenin kırınım deseninde soldaki pik $GaAs_yP_{1-x-y}N_x$ katmanına, sağdaki pik ise Si alttaşa aittir. GS303 numunesinin kırınım desenine simülasyon uygulandığında As oranı (y) %56.48 olarak tespit edildi. Azot oranı x ise %0.44

olarak belirlendi. GS303 numunesi için HRXRD sonucu kullanılarak kusur yoğunluğu $2.98x10^{-9}$ cm^{-2} olarak hesaplandı.



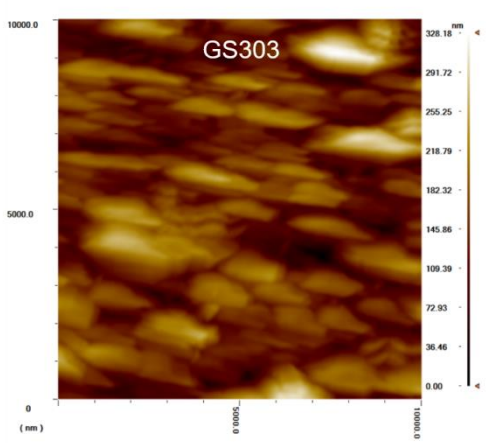
Şekil 4.31. GS303 numunesinin HRXRD kırınım deseni ve simülasyonu

İkincil İyon Kütle Spektrometresi (SIMS) Ölçümleri: GS303 numunesine ait SIMS derinlik profili Şekil 4.32'de verildi. SIMS derinlik profili değerlendirildiğinde yapıdaki atomik türlerin her bir katman için düzgün bir dağılıma sahip olduğu görülmektedir. Bu ölçümde katkı olarak kullanılan Be (p-tipi) atomik türünün varlığı iyi bir şekilde tespit edilmekle birlikte Si katkısının net ayrımı gözlenememiştir. Fosforun durumu incelendiğinde alttaşa girilmeden hemen önce artış gösterip tekrar azaldığı görülmektedir. Bu durumun Si alttaş üzerine büyütülen GaP tabakalarından kaynaklandığı görülmektedir.



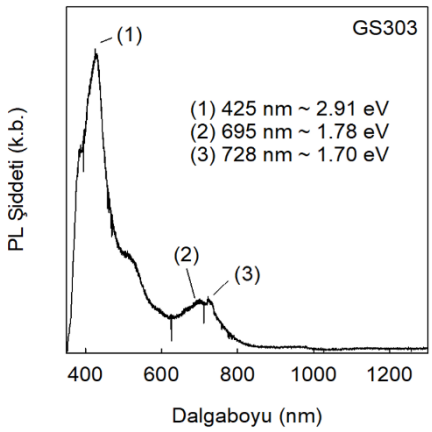
Şekil 4.32. GS303 numunesinin SIMS derinlik profili

Atomik Kuvvet Mikroskopu (AFM) Ölçümleri: GS303 numunesinin 10 μm × 10 μm AFM görüntüleri Şekil 4.33'de verildi. RMS değerinin 46.55 nm olduğu belirlendi. Yüksek olan bu RMS değerlerinin büyütme sonlandırma sürecinde P_2 akısının devamlılığından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.33. GS303 numunesinin 10 μm × 10 μm AFM görüntüleri

Fotolüminesans (PL) Ölçümleri: Si alttaş üzerine büyütülen GS303 numunesinin PL spektrumu Şekil 4.34'de verildi. Şekil incelendiğinde yaklaşık 425 nm'de (2.91 eV) bulunan pikin GaP, 695 nm'de (1.78 eV) bulunan pikin GaAsP, 728 nm'de (1.70 eV) bulunan pikin GaAsPN ve 927 nm'de (1.34 eV) bulunan pikin GaAsN'a ait olduğu düşünülmektedir.

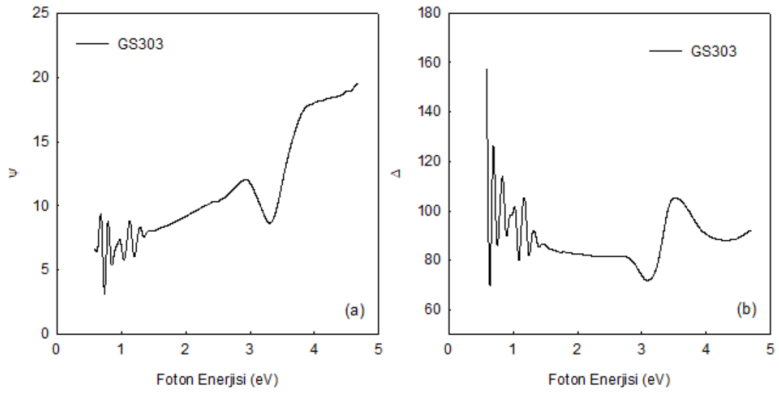


Şekil 4.34. GS303 numunesinin PL spektrumu

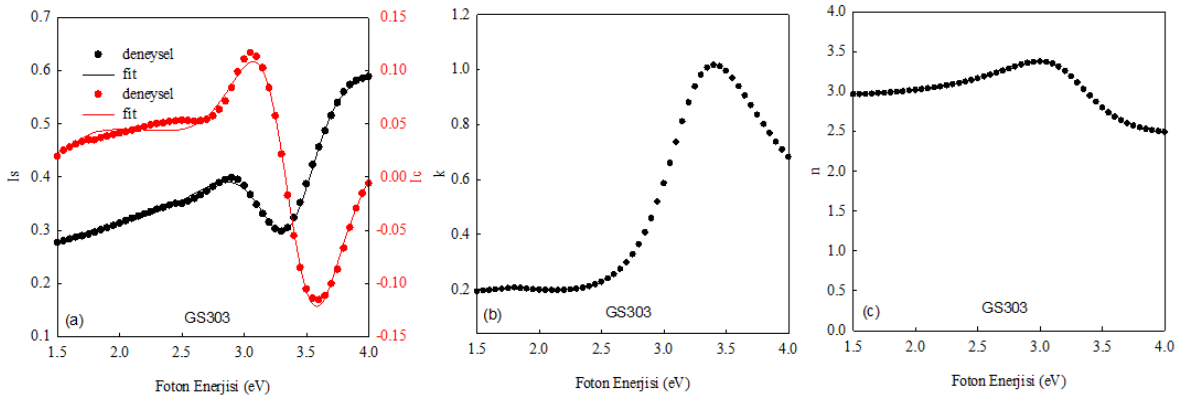
Spektroskopik Elipsometre (SE) Ölçümleri: GS303 numunesinin Ψ ve Δ elipsometrik parametrelerinin foton enerjisine göre değişimi Şekil 4.35'de sunuldu.

GS303 numunesi için Etkin Ortam yaklaşımı (Effective-Medium Approximation, EMA) kullanılarak ölçüm sonuçları modellendi. Modellemede, GaAsPN katmanı için Adachi-New Forouhi dispersiyon bağıntısı kullanıldı. Delta-Psi Yazılımı kullanılarak yapılan modelleme sonucunda GaAsPN tabakası için yasak enerji aralığı yaklaşık olarak 1.80 eV olarak belirlendi. Yasak enerji aralığının bu değerinin (her iki sistemin hata sınırları içinde) 1.70 eV olan PL sonucu ile uyumlu olduğu kabul edilebilir. Numune için modelleme sonucu Şekil 4.36(a)'da sunuldu ve deneysel veriler ile fit eğrilerinin uyumlu olduğu görüldü. Bu modelleme sonucunda

elde edilen sönüm sabiti eğrisi Şekil 4.36(b)'de; kırılma indisi eğrisi ise Şekil 4.36(c)'de sunuldu.



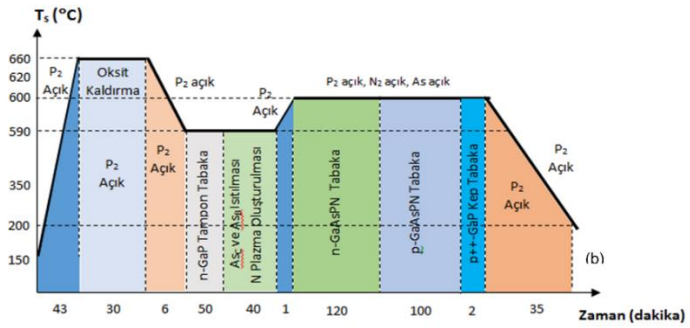
Şekil 4.35. GS303 numunesinin Ψ ve Δ elipsometrik parametrelerinin enerjisine göre değişimi



Şekil 4.36. GS303 numunesinin (a) Elipsometrik modelleme sonuçları (χ^2 değeri sırasıyla, 0.99'dir). (b) sönüm sabitinin (k) foton enerjisine göre değişimi (c) kırılma indisinin (n) foton enerjisine göre değişimi

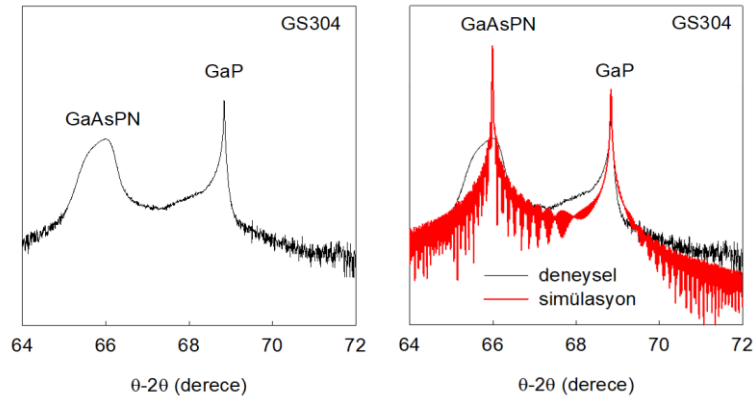
4.2.2 Seyreltik azotlu tek-renkli GaAsPN LED yapılarının GaP alttaşlar üzerine büyütülmesi ve karakterizasyonları

Seyreltik azotlu tek-renkli GaAsPN LED yapısı GaP alttaş üzerine Şekil 4.29'daki tasarımla büyütüldü. Numune, n-tipi GaP alttaş üstüne n-tipi GaP tampon tabakanın büyütülmesinin ardından n-tipi ve sonra p-tipi GaAsPN tabakalarının, son olarak aşırı katkılı p++GaP kep tabakasının büyütülmesi ile tamamlandı. GS304 numunesinin büyütme diyagramı Şekil 4.37'de verildi.



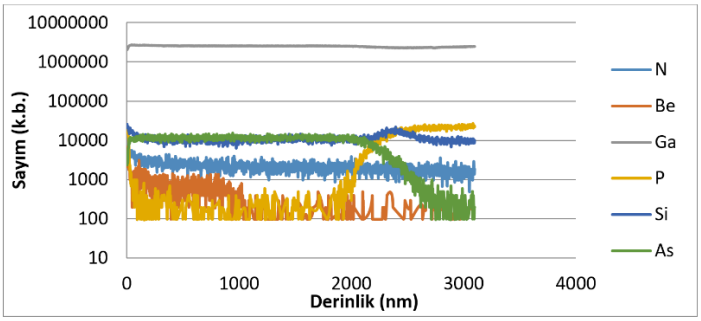
Şekil 4.37. GS304 numunesinin büyüme diyagramı

Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınımı (HRXRD) Ölçümleri: GS303 numunesinin HRXRD θ-2θ kırınım desenleri Şekil 4.38'de verildi. Numunenin kırınım deseninde soldaki pik $GaAs_yP_{1-x-y}N_x$ katmanına, sağdaki pik ise GaP alttaşa aittir. GS304 numunesinin kırınım desenlerine simülasyon uygulandığında As oranı (y) %56.00 olarak tespit edildi. Azot oranı x ise %0.40 olarak belirlendi. Ayrıca, GS304 numunesi için kusur yoğunluğu $2.95x10^{-9}$ cm^{-2} olarak bulundu ve bu değer GS303 numunesinde olduğu gibi kabul edilebilir düzeydedir.



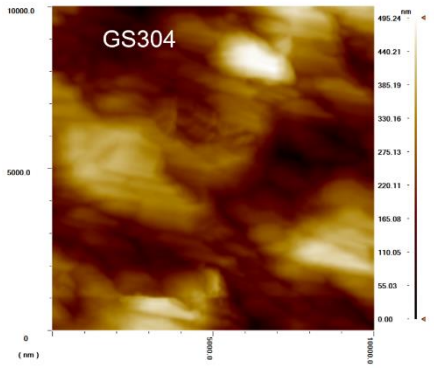
Şekil 4.38. GS304 numunesinin HRXRD kırınım deseni ve simülasyonu

İkincil İyon Kütle Spektrometresi (SIMS) Ölçümleri: GS304 numunesine ait SIMS derinlik profili Şekil 4.39'da verildi. SIMS derinlik profili değerlendirildiğinde yapıdaki atomik türlerin her bir katman için düzgün bir dağılıma sahip olduğu görülmektedir.



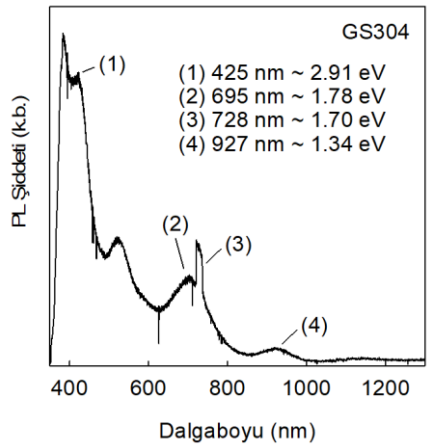
Şekil 4.39. GS304 numunesinin SIMS derinlik profili

Atomik Kuvvet Mikroskopu (AFM) Ölçümleri: GS304 numunesinin 10 μm × 10 μm AFM görüntüleri Şekil 4.40'da verildi. RMS değerinin 93.61 nm olduğu belirlendi. Yüksek olan bu RMS değerlerinin GS303 numunesinde olduğu gibi büyütme sonlandırma sürecinde P_2 akısının devamlılığından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.40. GS304 numunesinin 10 μm × 10 μm AFM görüntüsü

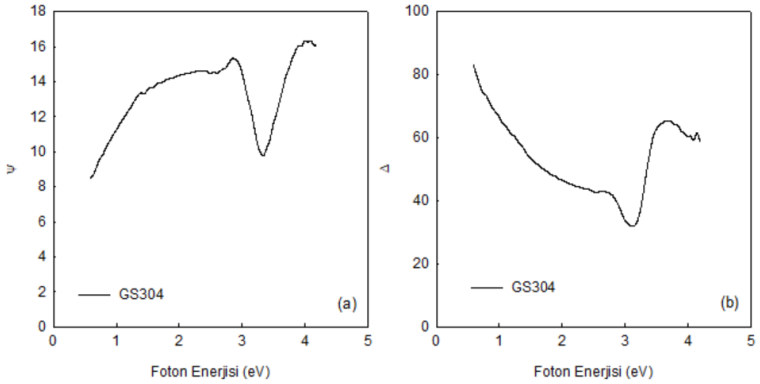
Fotolüminesans (PL) Ölçümleri: GaP alttaş üzerine büyütülen GS304 numunesinin PL spektrumu Şekil 4.41'de verildi. Şekil incelendiğinde yaklaşık 425 nm'de (2.91 eV) bulunan pikin GaP, 695 nm'de (1.78 eV) bulunan pikin GaAsP, 728 nm'de (1.70 eV) bulunan pikin GaAsPN ve 927 nm'de (1.34 eV) bulunan pikin GaAsN'a ait olduğu düşünülmektedir.



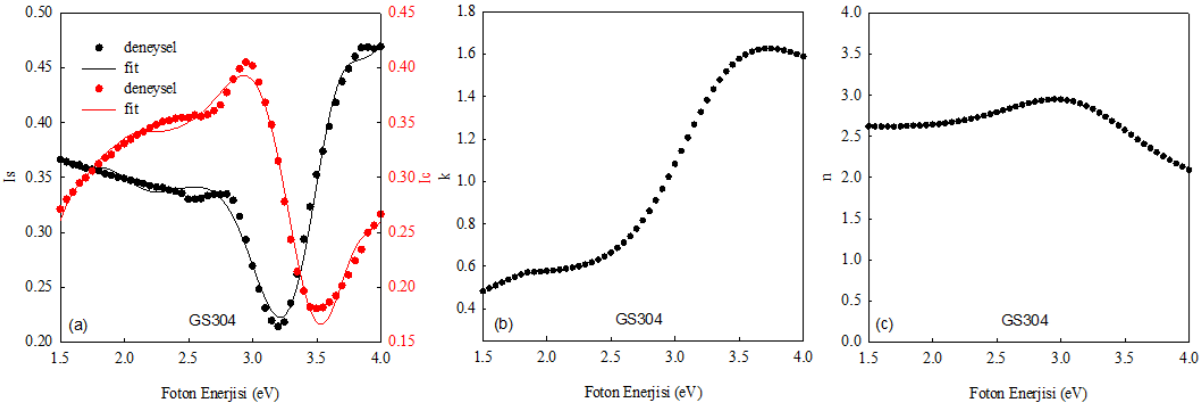
Şekil 4.41. GS304 numunesinin PL spektrumu

Spektroskopik Elipsometre (SE) Ölçümleri: Ψ ve Δ elipsometrik parametrelerinin foton enerjisine göre değişimi GS304 numunesi için Şekil 4.42'de sunuldu. GS304 numunesi için Etkin Ortam yaklaşımı (Effective-Medium Approximation, EMA) kullanılarak ölçüm sonuçları modellendi. Modellemede, GS303 numunesinde olduğu gibi GaAsPN katmanı için Adachi-New Forouhi dispersiyon bağıntısı kullanıldı. Deneysel veriler ile fit eğrilerinin uyumlu olduğu görülen Şekil 4.43(a)'da sunulan modelleme sonucunda GaAsPN tabakası için yasak enerji aralığı yaklaşık olarak 1.83 eV olarak belirlendi. Yasak enerji aralığının bu değerinin (her iki

sistemin hata sınırları içinde) 1.70 eV olan PL sonucu ile uyumlu olduğu kabul edilebilir. Bu modelleme sonucunda elde edilen sönüm sabiti eğrisi Şekil 4.43(b)'de; kırılma indisi eğrisi ise Şekil 4.43(c)'de sunuldu.



Şekil 4.42. GS304 numunesinin Ψ ve Δ elipsometrik parametrelerinin foton enerjisine göre değişimi



Şekil 4.43. GS304 numunesinin (a) Elipsometrik modelleme sonuçları (χ^2 değeri sırasıyla, 0.58'dir). (b) sönüm sabitinin (k) foton enerjisine göre değişimi (c) kırılma indisinin (n) foton enerjisine göre değişimi

III-V grubu malzemelerde N atomu yapıya girdiğinde bir yerleşik E_N enerji seviyesi oluşur. Bu seviye iletkenlik bandının üzerinde ve iletkenlik bandı kenarına oldukça yakındır. Bu seviyenin iletkenlik bandı ile etkileşimi sonucu iletkenlik bandı E_+ ve E_- olmak üzere iki alt banda ayrılır. Band Zıt-geçiş (Band Anticrossing Model, BAC) Modeli ile GaPN ve GaAsN gibi seyreltik azotlu alaşımlarının E_+ ve E_- band enerjileri,

$$E_{\pm} = \frac{1}{2}\left[\left(E_C + E_N\right) \pm \sqrt{\left(E_C + E_N\right)^2 + 4.V_{MN}{}^2.x} \right] \tag{4.1}$$

ifadesi ile belirlenir (Egorov, 2011). Burada E_C iletkenlik bandı enerjisi, E_N yerleşik azot seviyesi, V_{MN} iletkenlik bandı seviyesi ile yerleşik azot seviyesi arasındaki çiftlenim (etkileşim) sabiti ve x azot oranıdır. E_- malzemenin yasak enerji aralığı değerine karşılık gelmektedir (E_-~E_g). GaPN hesabı için $E_C = 2.78eV$, $E_N = 2.18eV$ ve $V_{MN} = 3.05eV$; GaAsN hesabı için $E_C = 1.42eV$, $E_N = 1.65eV$ ve $V_{MN} = 2.7eV$ değerleri kullanıldı (Egorov, 2011). $GaAs_yP_{1-x-y}N_x$ dörtlü alaşımının yasak enerji aralığı E_g,

$$E_- = (1-x-y)\left[E_-(GaPN)\right] + (x+y)\left[E_-(GaAsN)\right] + b_{GaAsP}(1-x-y)(x+y) = E_g(GaAsPN) \qquad (4.2)$$

eşitliği ile hesaplanır. $E_-(GaPN)$ ve $E_-(GaAsN)$ değerleri Eşitlik (4.1) ile bulunur. x ve y değerleri sırası ile GaAsPN alaşımındaki azot ve arsenik oranlarına karşılık gelir. Burada bükülme (bowing) parametresi b_{GaAsP} -0.21 eV olarak alındı (Egorov, 2011).

BAC modeli vasıtasıyla HRXRD desenlerinin simüle edilmesi ile bulunan alaşım oranları kullanılarak yasak enerji değerleri GS303 ve GS304 numuneleri için PL sonucu ile kıyaslamak amacıyla hesaplandı. Sonuçlar aşağıda Tablo 4.5'de sunuldu. Sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görüldü.

Tablo 4.5. BAC Modeli ve PL spektrumundan elde edilen yasak enerji aralığı değerleri

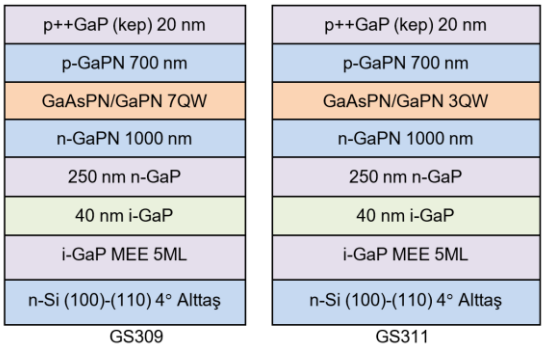
	HRXRD		**E_-(~E_g)_BAC Model**			**E_-(~E_g)_PL**		
Numune	**Azot oranı (x)**	**Arsenik oranı (y)**	**GaPN**	**GaAsN**	**GaAsPN**	**GaPN**	**GaAsN**	**GaAsPN**
GS303	%0.44	%56.48	2.12	1.32	1.72	Pik gözlenmedi.	Pik gözlenmedi.	1.70
GS304	%0.40	%56.00	2.12	1.33	1.73		1.34	1.70

4.3 Seyreltik Azotlu Kuantum Kuyulu GaAsPN/GaPN LED Yapılarının Büyütülmesi ve Analizleri

Seyreltik azotlu 3 ve 7 kuantum kuyulu GaAsPN/GaPN LED yapıları GaP ve Si alttaşlar üzerine MBE yöntemi ile büyütüldü. Si alttaş üzerine büyütülen 7 kuantum kuyulu GaAsPN/GaPN yapısı GS309 ve 3 kuantum kuyulu GaAsPN/GaPN yapısı ise GS311 olarak isimlendirildi. GaP alttaş üzerine büyütülen 7 kuantum kuyulu GaAsPN/GaPN yapısı GS312 ve 3 kuantum kuyulu GaAsPN/GaPN yapısı ise GS313 olarak isimlendirildi.

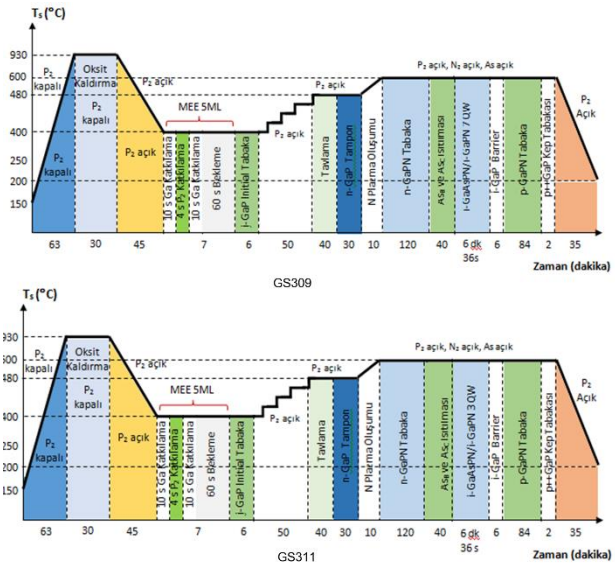
4.3.1 Seyreltik azotlu kuantum kuyulu GaAsPN/GaPN LED yapılarının Si alttaşlar üzerine büyütülmesi ve karakterizasyonları

Si alttaş üzerine büyütülen seyreltik azotlu kuantum kuyulu GaAsPN/GaPN LED yapılarının şematik gösterimi Şekil 4.44'de sunuldu.



Şekil 4.44. GS309 ve GS311 numunelerinin büyütülmesinin şematik gösterimleri

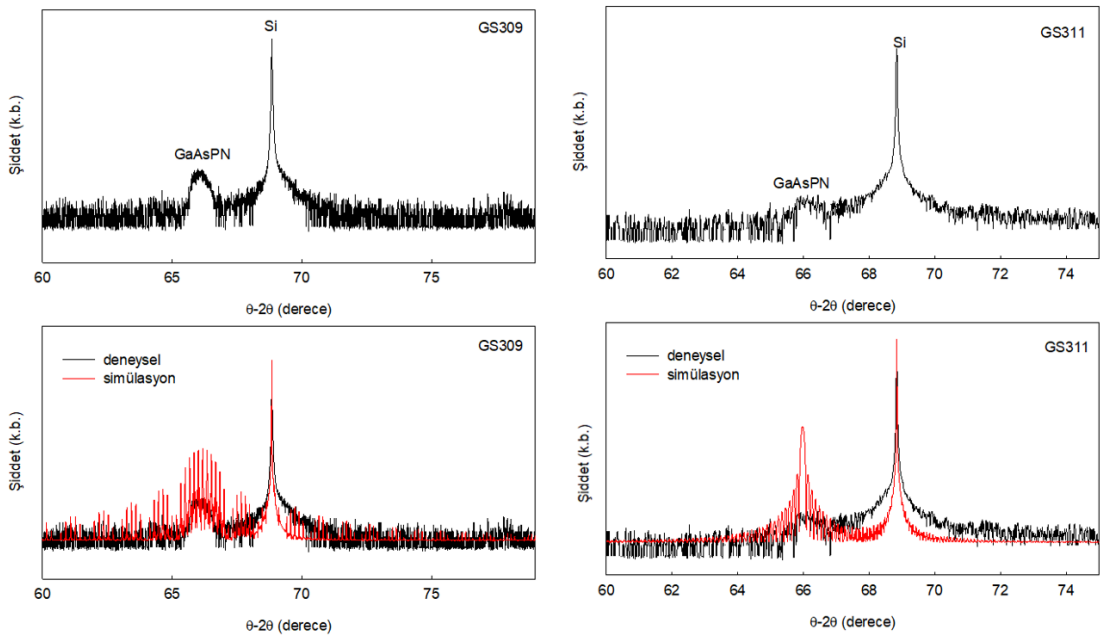
Daha önce büyütülen GS301 kristalinin büyütülme parametreleri referans alınarak GS309 ve GS311 numuneleri MBE sistemi ile (110) düzlemine 4°'lik açıyla kesilmiş (100) yönelimli Si alttaş üzerine büyütüldü. Birinci adım olarak büyütme odasında, örnek tutucuya yerleştirilen alttaşın oksit temizliği 930 °C'de gerçekleştirildi. Bu işlemden sonra alttaş sıcaklığı 45 dakika içerisinde 400 °C'ye indirildi. MEE tekniği ile, bu sıcaklıkta, Şekil 4.45'de verilen sürelerle 5x(Ga/P_2) çekirdekleşme katmanları oluşturuldu. Bu yöntem ile oluşturulan tabakanın üzerine katkısız GaP katmanı 400 °C'de büyütüldü. Daha sonra, P_2 akısı altında dakikada 1.6 °C adım-artımlı olarak 400 °C'den 480 °C'e kadar alttaş sıcaklığı basamaklı (ısıtma-bekleme-ısıtma) olarak arttırıldı. Alttaş 480 °C'de P_2 akısı altında 40 dakika tavlandı.



Şekil 4.45. GS309 ve GS311 numunelerinin büyütme diyagramları

Daha sonra n-tipi GaP tampon ve n-tipi GaPN tabakaları büyütüldü. Bu tabakadan sonra Arsenik bulk ve kırma hücresinin ısıtılması için P_2 akısı altında 40 dk büyütme durduruldu. Bu işlemden sonra 7 adet GaAsPN/GaPN kuantum kuyu tabakası 6dk/36s sürelerle büyütüldü. Büyütme p-tipi GaPN tabakası ve aşırı katkılı p++GaP kep tabakasının büyütülmesi ile tamamlandı. Büyütme işlemi tamamlanan numune P_2 akısı altında 200 °C'e kadar soğutularak sitemden dışarıya transfer edildi. Yukarıda yönelimleri verilen Si alttaş üzerine GS309 numunesi için uygulanan yöntem kullanılarak 3 kuantum kuyulu GS311 numunesi büyütüldü. GS309 ve GS311 numunelerinin büyütme diyagramları Şekil 4.45'de verildi.

Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınımı (HRXRD) Ölçümleri: GS309 ve GS311 numunelerinin HRXRD θ-2θ kırınım desenleri Şekil 4.46'da verildi. Örneklerin kırınım desenlerinde sağdaki pikler Si alttaşlara ait piklerdir. Kırınım desenlerindeki solda gözlenen periyodik pikler ise $GaAs_yP_{1-x-y}N_x$ kuantum kuyulara karşılık gelen kırınım pikleridir. Bu pikler kuantum kuyularına ait uydu pikleri olarak adlandırılır. Numunelerin kırınım desenlerine LEPTOS yazılımı vasıtasıyla uygulanan simülasyonlar sonucunda Arsenik (As), Azot (N) ve Fosfor (P) oranları tespit edildi ve Tablo 4.6'da sunuldu. Şekil 4.46 incelendiğinde büyütülen yapılardaki kuantum kuyuların bu şekilde gözlenmesinin iyi kristal kalitesine işaret ettiği düşünülmektedir. Ayrıca, kusur yoğunluğu GS309 numunesi için $0.83x10^{-9}$ cm^{-2} olarak hesaplandı. GS311 numunesinin HRXRD desenindeki GaAsPN tabakasına ait pikin FWHM değeri GS309 numunesinde olduğu gibi elde edilemediğinden kusur yoğunluğu belirlenememiştir.

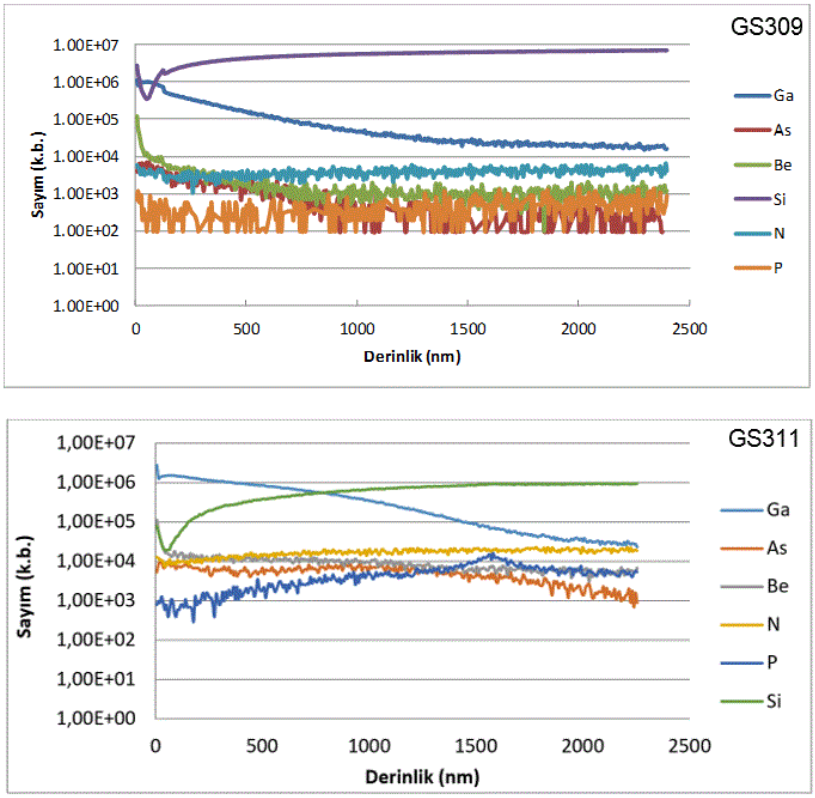


Şekil 4.46. Kuantum kuyulu GS309 ve GS311 numunelerinin HRXRD kırınım desenleri

Tablo 4.6. HRXRD kırınım desenlerinden simülasyonlar sonucu belirlenen As, N ve P oranları

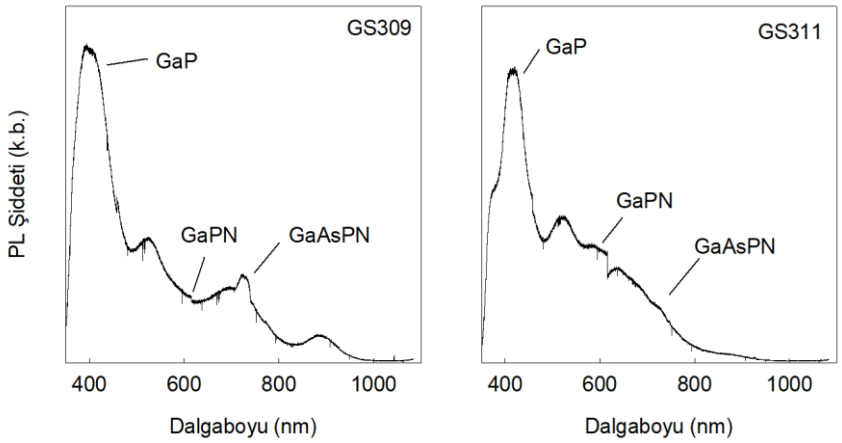
Numune	Azot oranı (x)	Arsenik oranı (y)	Fosfor oranı (1-x-y)
GS309	%0.40	%55.78	%43.82
GS311	%0.41	%59.00	%40.59

İkincil İyon Kütle Spektrometresi (SIMS) Ölçümleri: GS309 ve GS311 numunelerine ait SIMS derinlik profilleri Şekil 4.47'de verildi. SIMS derinlik profili değerlendirildiğinde yapılardaki atomik türlerin her bir katman için varlığı görülmektedir. Bununla birlikte kuantum kuyu ayrımları tekniğin sınırları nedeniyle tam olarak gözlenememektedir.



Şekil 4.47. GS309 ve GS311 numunelerinin SIMS derinlik profili

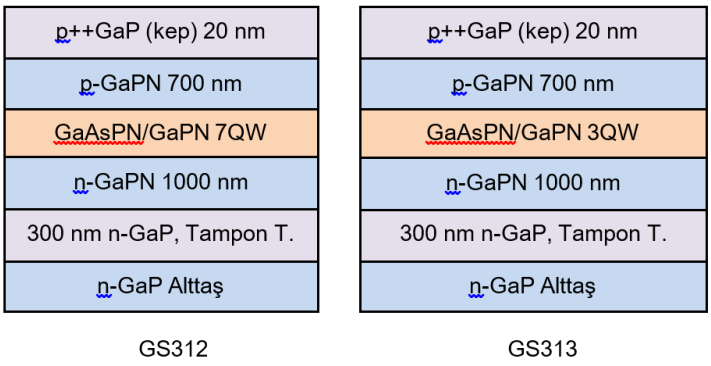
Fotolüminesans (PL) Ölçümleri: Si alttaş üzerine büyütülen kuantum kuyulu GS309 ve GS311 numunelerinin PL spektrumu Şekil 4.48'de verildi. Şekil incelendiğinde yaklaşık 425 nm'de (2.98 eV) bulunan pikin GaP'a, 595 nm'de (2.08 eV) bulunan pikin GaPN'a ve 725 nm'de (1.71 eV) bulunan pikin GaAsPN'a ait olduğu düşünülmektedir. Burada pik tepe değerleri, piklere Gaussian fit yapılarak elde edilen değerlerdir. Spektrumdaki diğer piklerin ise kusur seviyelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



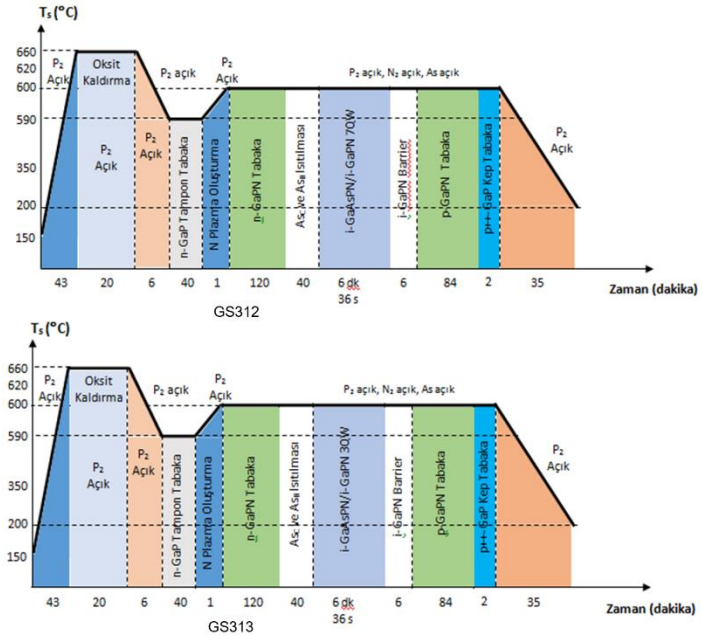
Şekil 4.48. GS309 ve GS311 numunelerinin PL spektrumları

4.3.2 Seyreltik azotlu kuantum kuyulu GaAsPN/GaPN LED yapılarının GaP alttaşlar üzerine büyütülmesi ve karakterizasyonları

GS312 ve GS313 olarak isimlendirilen numuneler n-tipi GaP alttaş üstüne sırasıyla 3 ve 7 kuantum kuyulu olarak büyütüldü (Şekil 4.49). GaP alttaşın oksit temizliği P_2 akısı altında 660 °C'de gerçekleştirildi ve 6dk içerisinde alttaş sıcaklığı 590 °C'ye indirilerek n-tipi GaP tampon tabakası büyütüldü. N-plazma oluşturulması süresince (1dk) alttaş sıcaklığı 600 °C çıkarıldı ve ardından n-tipi GaPN tabakası büyütüldü. Daha sonra 7 adet GaAsPN/GaPN kuantum kuyu tabakası 6 dk/36 s sürelerle büyütüldü. Kuantum kuyuları üzerine p-tipi GaPN tabakası ve son olarak aşırı katkılı p++GaP kep tabakasının oluşturulması ile büyütme işlemi tamamlandı. Benzer yöntemle GS313 numunesi 3 kuantum kuyulu olacak şekilde büyütüldü. GS312 ve GS313 numunelerinin büyütme diyagramları Şekil 4.50'de verildi.

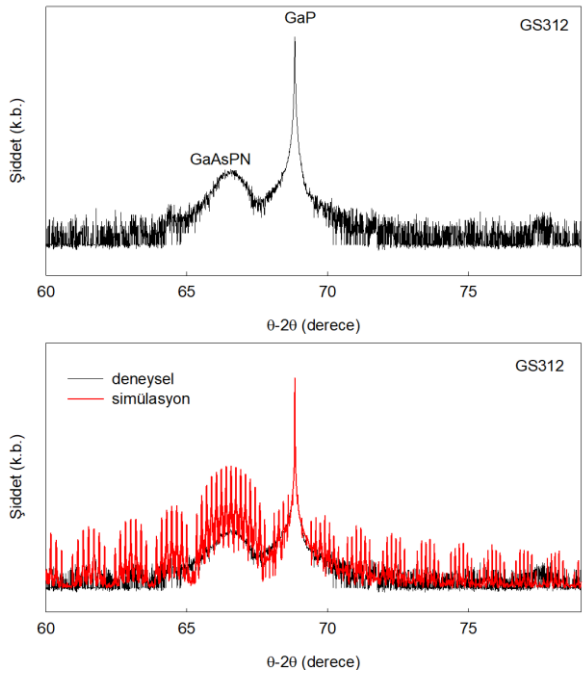


Şekil 4.49. GS312 ve GS313 numunelerinin büyütülmesinin şematik gösterimleri

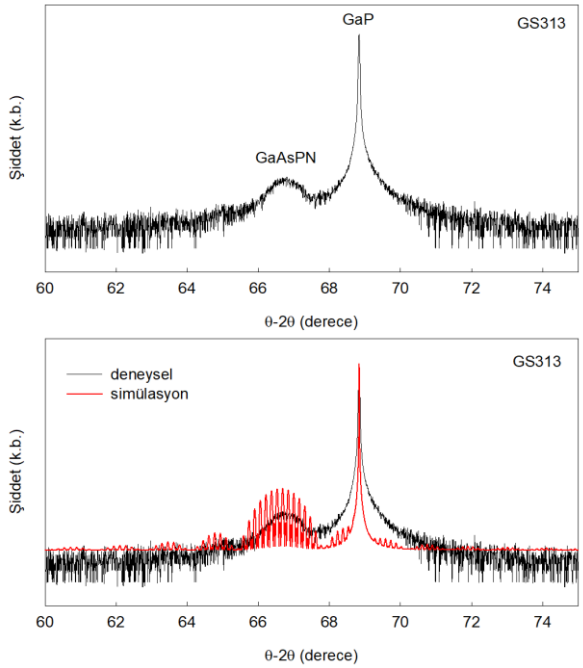


Şekil 4.50. GS312 ve GS313 numunelerinin büyütme diyagramları

Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınımı (HRXRD) Ölçümleri: GS312 ve GS313 numunelerinin HRXRD θ-2θ kırınım desenleri Şekil 4.51 ve 4.52'de verildi.



Şekil 4.51. 7 kuantum kuyulu GS312 numunesinin HRXRD kırınım deseni



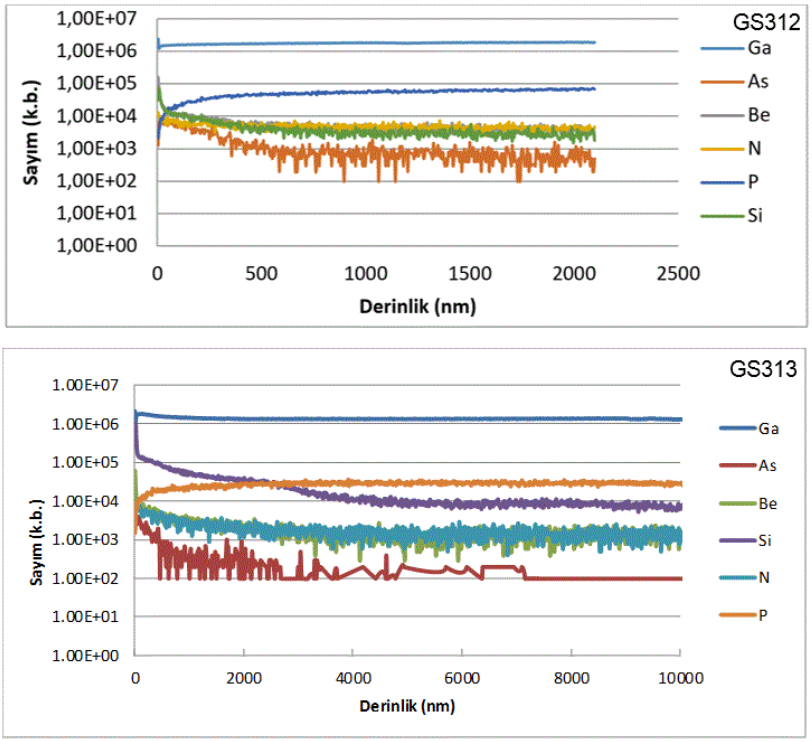
Şekil 4.52. 3 kuantum kuyulu GS313 numunesinin HRXRD kırınım deseni

Örneklerin kırınım desenlerinde sağdaki pikler GaP alttaşlara ait piklerdir. Kırınım desenlerindeki solda gözlenen periyodik pikler ise $GaAs_yP_{1-x-y}N_x$ kuantum kuyulara karşılık gelen kırınım pikleridir. Bu pikler kuantum kuyularına ait uydu pikleri olarak adlandırılır. Numunelerin kırınım desenlerine LEPTOS yazılımı vasıtasıyla uygulanan simülasyonlar sonucunda Arsenik (As), Azot (N) ve Fosfor (P) oranları tespit edildi ve Tablo 4.7'de sunuldu. Şekil 4.51 ve Şekil 4.52 incelendiğinde büyütülen yapılardaki kuantum kuyuların bu şekilde gözlenmesinin iyi kristal kalitesine işaret ettiği düşünülmektedir. Ayrıca GS312 numunesindeki GaP'a ait olan kırınım pikinin pik yarı genişliğinin az olmasının ve herhangi bir omuz oluşmamasının alttaş üzerine büyütülen GaP katmanlarının düzgün bir şekilde büyüdüğüne işaret ettiği düşünülmektedir. GS312 ve GS313 numunelerinin kusur yoğunlukları sırasıyla, $7.80x10^{-9}$ ve $7.37x10^{-9}$ cm^{-2} olarak belirlendi.

Tablo 4.7. HRXRD kırınım desenlerinden simülasyonlar sonucu belirlenen As, N ve P oranları

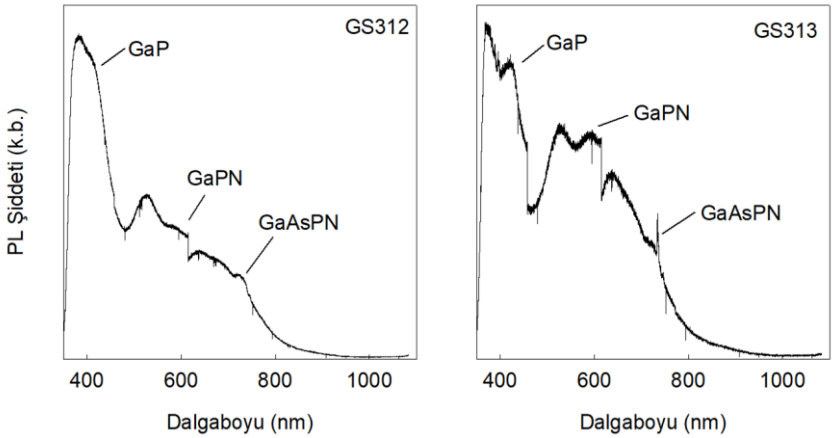
Numune	Azot oranı (x)	Arsenik oranı (y)	Fosfor oranı (1-x-y)
GS312	%0.43	%48.35	%51.22
GS313	%0.42	%47.14	%52.44

İkincil İyon Kütle Spektrometresi (SIMS) Ölçümleri: GS312 ve GS313 numunelerine ait SIMS derinlik profili Şekil 4.53'de verildi. SIMS derinlik profili değerlendirildiğinde yapıdaki atomik türlerin her bir katman var olduğu ve düzgün bir dağılıma sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.53. GS312 ve GS313 numunelerinin SIMS derinlik profili

Fotolüminesans (PL) Ölçümleri: GaP alttaş üzerine büyütülen kuantum kuyulu GS312 ve GS313 numunelerinin PL spektrumu Şekil 4.54'de verildi.



Şekil 4.54. GS312 ve GS313 numunelerinin PL spektrumları

Şekil 4.54 incelendiğinde yaklaşık 425 nm'de (2.98 eV) bulunan pikin GaP'a, 595 nm'de (2.08 eV) bulunan pikin GaPN'a ve 725 nm'de (1.71 eV) bulunan pikin GaAsPN'a ait olduğu düşünülmektedir. Burada pik tepe değerleri, piklere Gaussian fit yapılarak elde edilen değerlerdir. Spektrumdaki diğer piklerin ise kusur seviyelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

BAC modeli vasıtasıyla HRXRD desenlerinin simüle edilmesi ile bulunan alaşım oranları kullanılarak yasak enerji değerleri GS309, GS311, GS312 ve GS313 numuneleri için PL sonucu ile kıyaslamak amacıyla hesaplandı ve Tablo 4.8'de sunuldu. Sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görüldü.

Tablo 4.8. BAC Modeli ve PL spektrumundan elde edilen yasak enerji aralığı değerleri

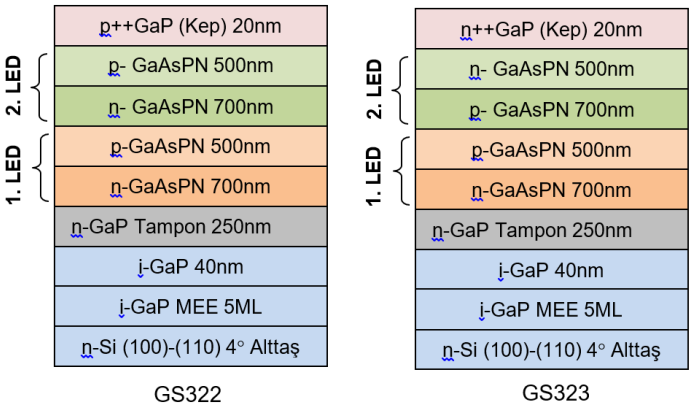
	HRXRD		E.(~E_g)_BAC Model		E.(~E_g)_PL	
Numune	**Azot oranı (x)**	**Arsenik oranı (y)**	**GaPN**	**GaAsPN**	**GaPN**	**GaAsPN**
GS309	%0.40	%55.78	2.12	1.73	2.08	1.71
GS311	%0.41	%59.00	2.12	1.70	2.08	1.71
GS312	%0.43	%48.35	2.12	1.78	2.08	1.71
GS313	%0.42	%47.14	2.12	1.79	2.08	1.71

4.4 Seyreltik Azotlu İki-Renkli GaAsPN LED Yapılarının Büyütülmesi ve Analizleri

Seyreltik azotlu iki-renkli GaAsPN LED yapıları GaP ve Si alttaşlar üzerine MBE yöntemi ile büyütüldü. Si alttaş üzerine büyütülen seri LED yapısı GS322 ve paralel LED yapısı ise GS323 olarak isimlendirildi. GaP alttaş üzerine büyütülen seri LED yapısı GS324 ve paralel LED yapısı ise GS325 olarak isimlendirildi.

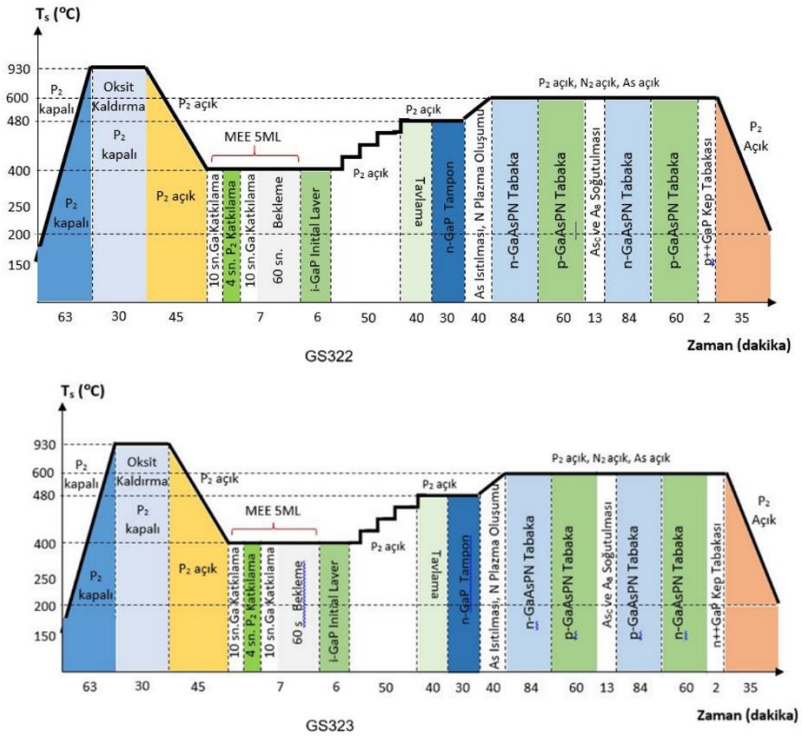
4.4.1 Seyreltik azotlu iki-renkli GaAsPN LED yapılarının Si alttaşlar üzerine büyütülmesi ve karakterizasyonları

Si alttaş üzerine büyütülen seyreltik azotlu iki-renkli GaAsPN LED yapılarının şematik gösterimi Şekil 4.55'de sunuldu.



Şekil 4.55. GS322 ve GS323 numunelerinin büyütülmesinin şematik gösterimleri

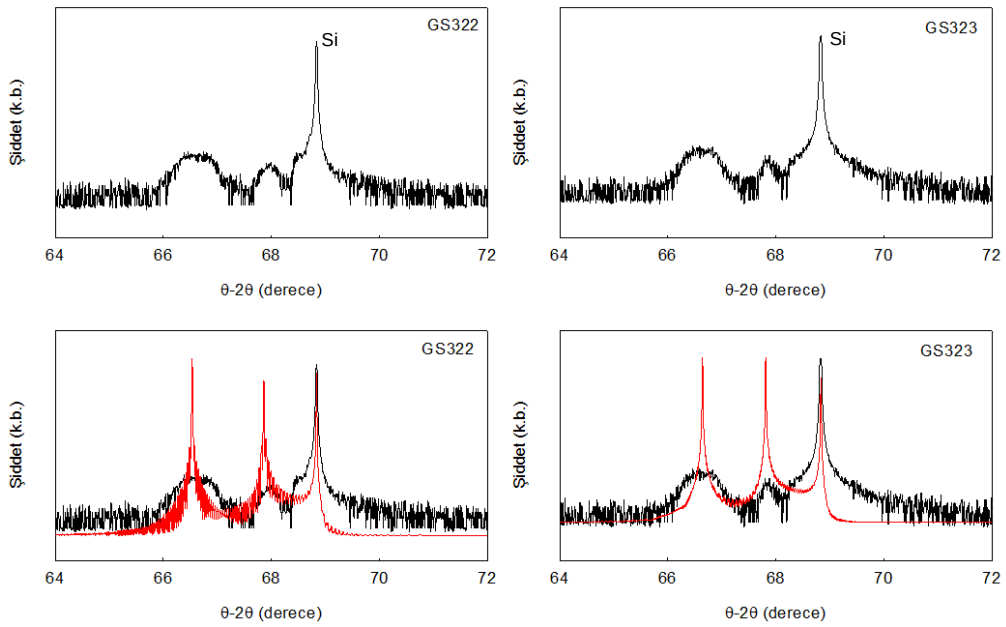
İlk gaz temizlikleri yapılan ve manipülatöre yerleştirilen (110) düzlemine 4°'lik açıyla kesilmiş (100) yönelimli Si alttaşlar 930 °C'ye kadar ısıtılarak yüzeyden oksitin uzaklaştırılması sağlandı ve tek kristal yapının ortaya çıktığı ve yüzeyin oksitten arındırıldığı RHEED ile gözlendi. Alttaş sıcaklığı 400 °C'ye düşürüldükten sonra MEE tekniği ile 5x(Ga/P_2) tabakasının büyütülmesi gerçekleştirildi. Bu yöntem ile oluşturulan tabakanın üzerine katkısız GaP katmanı 400 °C'de büyütüldü. Daha sonra, alttaş sıcaklığı P_2 akısı altında dakikada 1.6 °C adım-artımlı olarak 400 °C'den 480 °C'ye kadar arttırıldı. Alttaş 480 °C'de 40 dakika tavlandı. Daha sonra n-GaP tampon tabakası 480 °C'de büyütüldü. Alttaş sıcaklığı 600°C'ye çıkarılarak Şekil 4.55'de sunulan büyütme tasarımlarındaki GS322 numunesi seri, GS323 numunesi ise paralel eklem düzeninde büyütüldü. Biri seri diğeri paralel olmak üzere iki adet p-n eklem GaAsPN aktif katmanın ardından GS322 numunesinde p++GaP, GS323 numunesinde ise n++GaP kep tabakalar ile büyütme tamamlandı. GS322 ve GS323 numunelerinin büyütme diyagramları Şekil 4.56'da sunuldu.



Şekil 4.56. GS322 ve GS323 numunelerinin büyütme diyagramları

Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınımı (HRXRD) Ölçümleri: GS322 ve GS323 numunelerinin HRXRD θ-2θ kırınım desenleri Şekil 4.57'de verildi. Örneklerin kırınım desenlerinde sağdaki pikler Si alttaşlara ait piklerdir. Kırınım desenlerindeki solda gözlenen pikler ise GaAsPN katmanlarından kaynaklanan kırınım pikleridir. Büyütülen numunede iki adet GaAsPN kırınım

piki gözlenmiştir ve bu iki ayrı fosfor ve arsenik kompozisyon değerine sahip GaAsPN katmanı olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 4.57. GS322 ve GS323 numunelerinin HRXRD kırınım desenleri ve simülasyonları

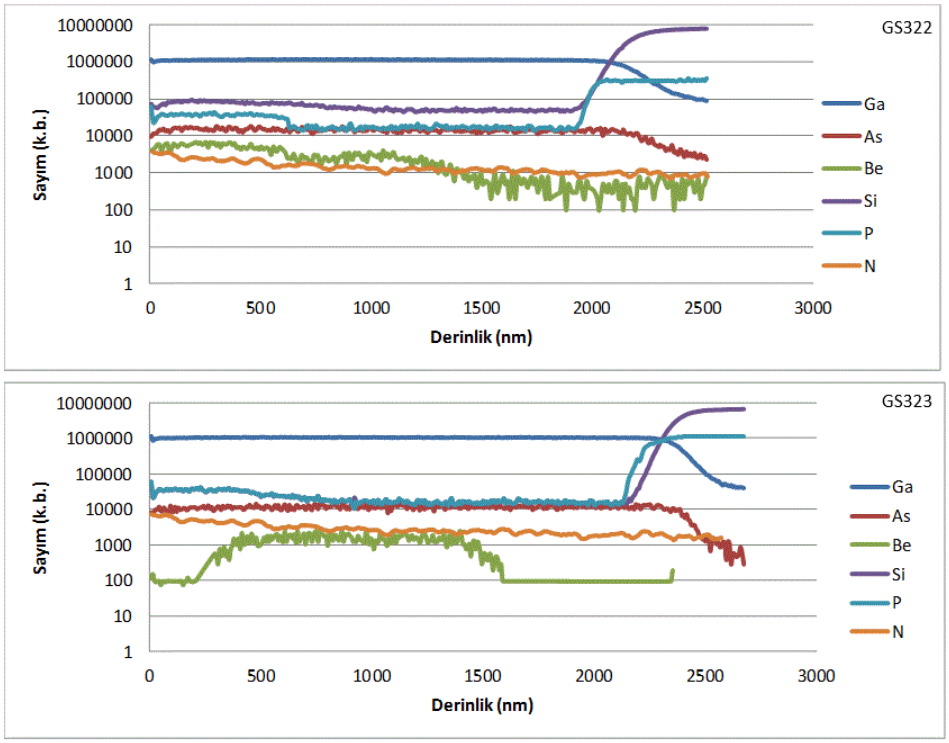
Numunelerin kırınım desenlerine LEPTOS yazılımı vasıtasıyla uygulanan simülasyonlar sonucunda Arsenik (As), Azot (N) ve Fosfor (P) oranları tespit edildi ve Tablo 4.9'da sunuldu. Şekil 4.57 incelendiğinde büyütülen yapılardaki iki ayrı GaAsPN piki gözlenmesinin iki-renkli LED yapısı büyütme hedefine ulaşıldığının göstergesidir.

Tablo 4.9. HRXRD kırınım desenlerinden simülasyonlar sonucu belirlenen As, N ve P oranları

Numune	Azot oranı (x)	Arsenik oranı (y)		Fosfor oranı (1-x-y)	
		1.LED	2.LED	1.LED	2.LED
GS322	%0.42	%35	%10	%64.58	%89.58
GS323	%0.43	%33	%11	%66.57	%88.57

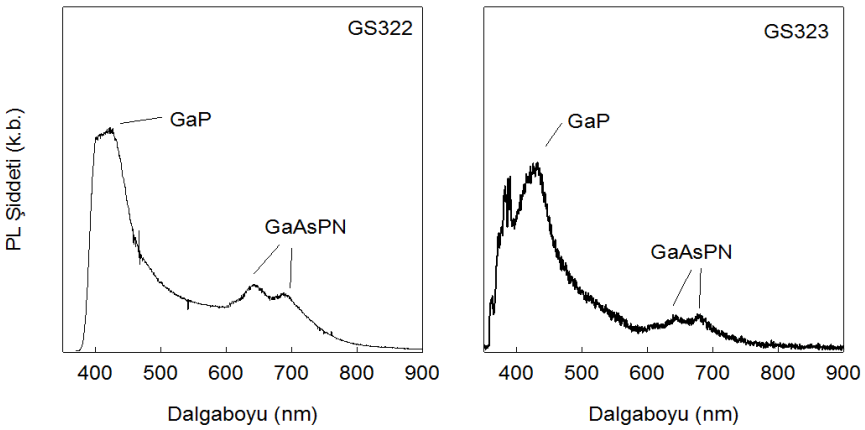
GS322 ve GS323 numuneleri için kusur yoğunlukları 1. LED'ler için sırasıyla, $1.12x10^{-9}$ ve $3.46x10^{-9}$ cm^{-2}; 2. LED'ler için sırasıyla, $0.18x10^{-9}$ ve $0.96x10^{-9}$ cm^{-2} olarak belirlendi.

İkincil İyon Kütle Spektrometresi (SIMS) Ölçümleri: GS322 ve GS323 numunelerine ait SIMS derinlik profili Şekil 4.58'de verildi. SIMS derinlik profili değerlendirildiğinde yapılardaki atomik türlerin her bir katman için olması gereken bölgede ve düzgün bir dağılıma sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, P atomik dağılımının iki farklı platoya sahip olması, iki p-n eklemdeki P miktarının, beklentiye uygun olarak, farklı olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.58. GS322 ve GS323 numunesinin SIMS derinlik profilleri

Fotolüminesans (PL) Ölçümleri: GaP alttaş üzerine büyütülen kuantum kuyulu GS322 ve GS323 numunelerinin PL spektrumu Şekil 4.59'da verildi.

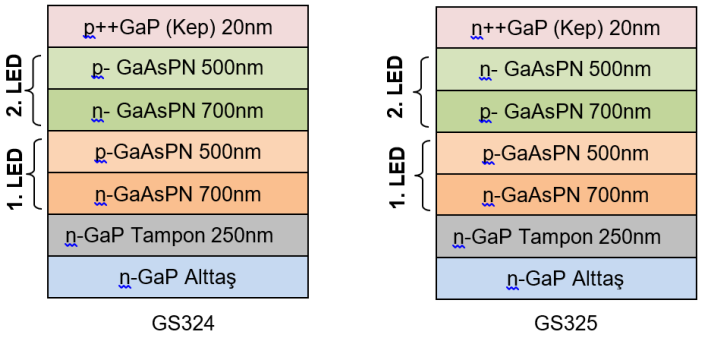


Şekil 4.59. GS322 ve GS323 numunelerinin PL spektrumları

Şekil 4.59 incelendiğinde GS322 için yaklaşık 425 nm'de (2.98 eV) bulunan pikin GaP'a, yaklaşık 639 ve 691 nm'de (1.94 ve 1.79 eV) bulunan piklerin ise iki ayrı fosfor ve arsenik kompozisyon değerine sahip GaAsPN tabakalarına ait olduğu düşünülmektedir. GS323 için yaklaşık 425 nm'de (2.98 eV) bulunan pik yine GaP'a, yaklaşık 644 ve 681 nm'de (1.92 ve 1.82 eV) bulunan piklerin ise iki ayrı fosfor ve arsenik kompozisyon değerine sahip GaAsPN

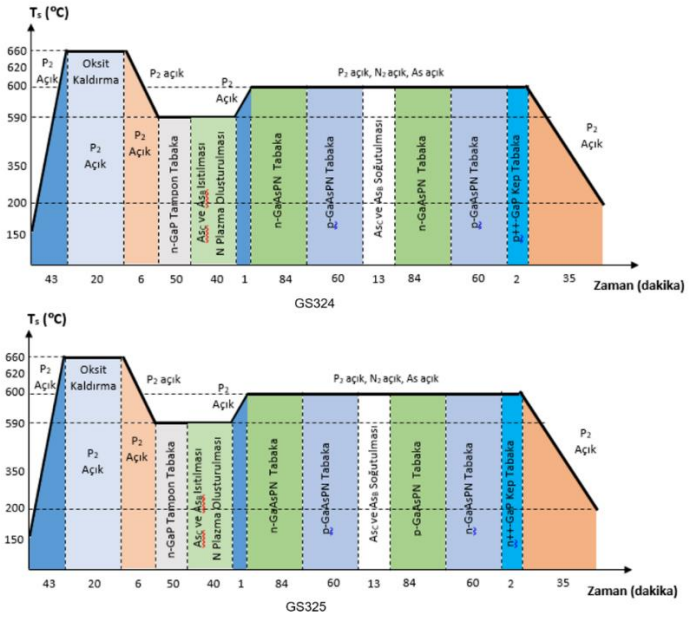
tabakalarına ait olduğu düşünülmektedir. Burada pik tepe değerleri, piklere Gaussian fit yapılarak elde edilen değerlerdir. Spektrumdaki diğer piklerin ise kusur seviyelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

4.4.2 Seyreltik azotlu iki-renkli GaAsPN LED yapılarının GaP alttaşlar üzerine büyütülmesi ve karakterizasyonları



Şekil 4.60. GS324 ve GS325 numunelerinin büyütülmesinin şematik gösterimleri

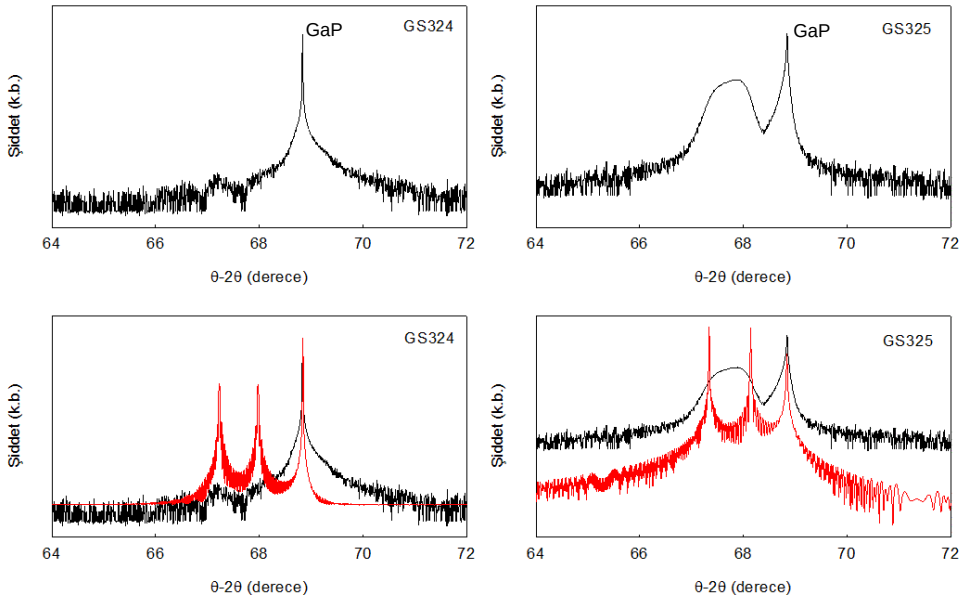
İlk gaz temizlikleri yapılan ve manipülatöre yerleştirilen GaP alttaşlar 660 °C'ye kadar ısıtılarak yüzeyden oksitin uzaklaştırılması sağlandı ve tek kristal yapının ortaya çıktığı ve yüzeyin oksitten arındırıldığı RHEED ile gözlendi. Alttaş sıcaklığı 590°C'ye indirildikten sonra n-GaP tampon tabakası büyütüldü. Alttaş sıcaklığı 600°C'ye çıkarılarak Şekil 4.60'da sunulan büyütme tasarımlarındaki GS324 numunesi seri, GS325 numunesi ise paralel eklem düzeninde büyütüldü.



Şekil 4.61. GS324 ve GS325 numunelerinin büyütme diyagramları

Biri seri diğeri paralel olmak üzere iki adet p-n eklem GaAsPN aktif katmanın ardından GS324 numunesinde p++GaP, GS325 numunesinde ise n++GaP kep tabakalar ile büyütme tamamlandı. GS324 ve GS325 numunelerinin büyütme diyagramları Şekil 4.61'de sunuldu.

Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınımı (HRXRD) Ölçümleri:



Şekil 4.62. GS324 ve GS325 numunelerinin HRXRD kırınım desenleri ve simülasyonları

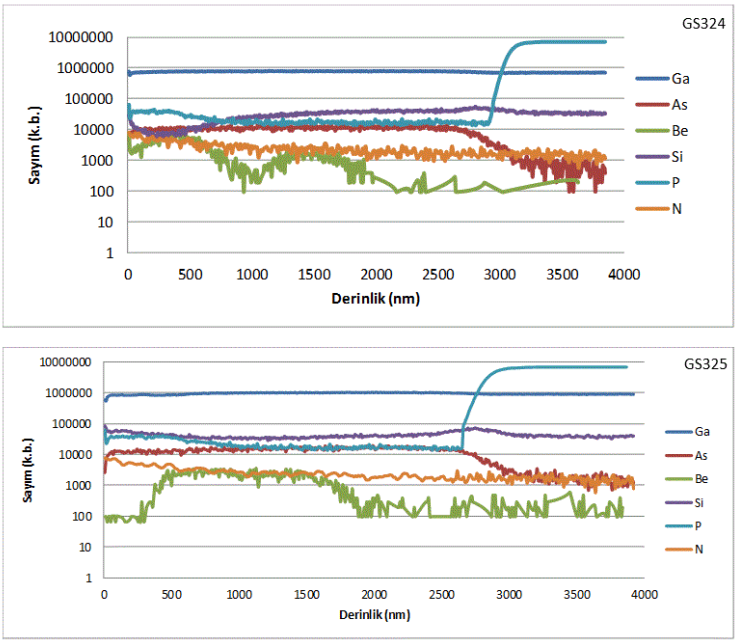
GS324 ve GS325 numunelerinin HRXRD θ-2θ kırınım desenleri Şekil 4.62'de verildi. GS322 ve GS323 numunelerinde olduğu gibi, örneklerin kırınım desenlerinde sağdaki pikler GaP alttaşlara ait pikler ve kırınım desenlerindeki solda gözlenen pikler ise GaAsPN katmanlarından kaynaklanan kırınım pikleridir. Büyütülen numunede iki adet GaAsPN kırınım piki gözlenmiştir ve bu iki ayrı fosfor ve arsenik kompozisyon değerine sahip GaAsPN katmanı olduğuna işaret etmektedir. Numunelerin kırınım desenlerine LEPTOS yazılımı vasıtasıyla uygulanan simülasyonlar sonucunda Arsenik (As), Azot (N) ve Fosfor (P) oranları tespit edildi ve Tablo 4.10'da sunuldu. Şekil 4.62 incelendiğinde büyütülen yapılardaki iki ayrı GaAsPN piki gözlenmesinin iki-renkli LED yapısı büyütme hedefine ulaşıldığının göstergesidir.

Tablo 4.10. HRXRD kırınım desenlerinden simülasyonlar sonucu belirlenen As, N ve P oranları

Numune	Azot oranı (x)	Arsenik oranı (y)		Fosfor oranı (1-x-y)	
		1.LED	2.LED	1.LED	2.LED
GS324	%0.40	%32	%18	%67.60	%81.60
GS325	%0.42	%30	%15	%69.58	%84.58

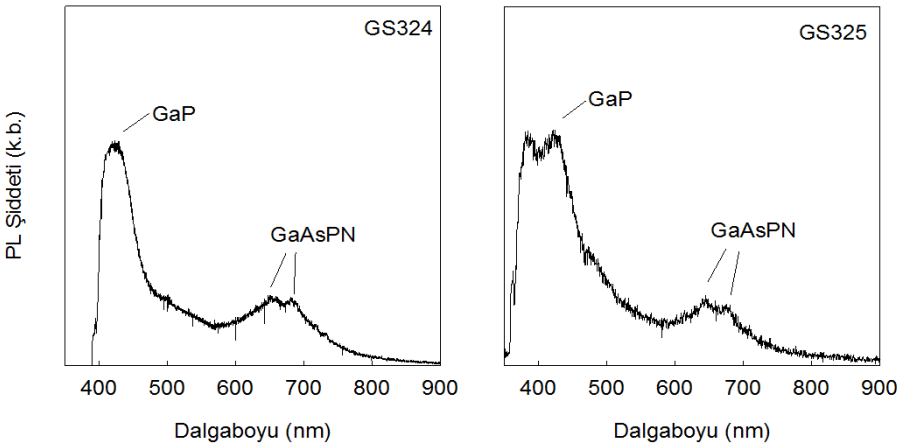
GS324 ve GS325 numunelerinin HRXRD desenlerindeki pikler FWHM değerleri doğru belirlemeye elverişli olmadığından kusur yoğunlukları tam olarak belirlenememiştir.

İkincil İyon Kütle Spektrometresi (SIMS) Ölçümleri: GS324 ve GS325 numunelerine ait SIMS derinlik profilleri Şekil 4.63'de verildi. SIMS derinlik profilleri değerlendirildiğinde yapılardaki atomik türlerin her bir katman için düzgün bir dağılıma sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.63. GS324 ve GS325 numunesinin SIMS derinlik profilleri

Fotolüminesans (PL) Ölçümleri: GaP alttaş üzerine büyütülen kuantum kuyulu GS324 ve GS325 numunelerinin PL spektrumu Şekil 4.64'de verildi.



Şekil 4.64. GS324 ve GS325 numunelerinin PL spektrumları

Şekil 4.64 incelendiğinde GS324 için yaklaşık 425 nm'de (2.98 eV) bulunan pikin GaP'a, yaklaşık 652 ve 683 nm'de (1.90 ve 1.81 eV) bulunan piklerin ise iki ayrı fosfor ve arsenik kompozisyon değerine sahip GaAsPN tabakalarına ait olduğu düşünülmektedir. GS323 için yaklaşık 425 nm'de (2.98 eV) bulunan pik yine GaP'a, yaklaşık 648 ve 680 nm'de (1.91 ve 1.82 eV) bulunan piklerin ise iki ayrı fosfor ve arsenik kompozisyon değerine sahip GaAsPN

tabakalarına ait olduğu düşünülmektedir. Burada pik tepe değerleri, piklere Gaussian fit yapılarak elde edilen değerlerdir. Spektrumdaki diğer piklerin ise yine kusur seviyelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

BAC modeli vasıtasıyla HRXRD desenlerinin simüle edilmesi ile bulunan alaşım oranları kullanılarak yasak enerji değerleri GS322, GS323, GS324 ve GS325 numuneleri için PL sonucu ile kıyaslamak amacıyla hesaplandı ve Tablo 4.11'de sunuldu. Sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görüldü.

Tablo 4.11. BAC Modeli ve PL spektrumundan elde edilen yasak enerji aralığı değerleri

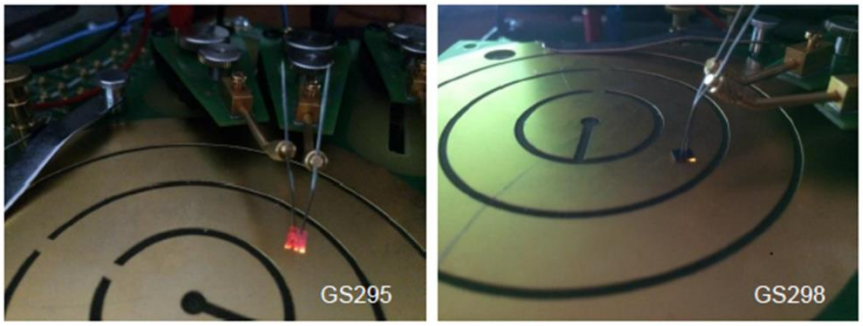
Numune	HRXRD			$E_+(\sim E_g)$ (eV) BAC Model		$E_+(\sim E_g)$ (eV) PL	
	Azot oranı (x)	Arsenik oranı (y)		GaAsPN		GaAsPN	
		1.LED	2.LED	1.LED	2.LED	1.LED	2.LED
GS322	%0.42	%35	%10	1.82	1.97	1.79	1.94
GS323	%0.43	%33	%11	1.83	1.96	1.82	1.92
GS324	%0.40	%32	%18	1.84	1.93	1.81	1.90
GS325	%0.42	%30	%15	1.85	1.94	1.82	1.91

4.5 LED Yapılarının Fabrikasyonu

Bu bölümde, Si ve GaP alttaşlar üzerine büyütülen seyreltik azotlu III-V grubu GaAsPN tek-renkli, iki-renkli ve kuantum kuyulu LED yapılarının LED aygıt fabrikasyonu sunuldu.

4.5.1 GS295 ve GS298 Numunelerinin Fabrikasyonu

Büyütülen p-n eklem yapısına sahip GS295 ve GS298 numunelerine herhangi bir fabrikasyon işlemi yapılmadan, deneme amacıyla, gerilim uygulandı ve ışıma yaptıkları gözlendi. Bu ışıma görüntüleri Şekil 4.65'de sunuldu.



Şekil 4.65. GS295 ve GS298 numunelerinin voltaj altında ışıma görüntüleri

GS295 ve GS298 p-n eklem yapılarının LED aygıt fabrikasyonu için aşağıda sunulan çalışmalar yapıldı:

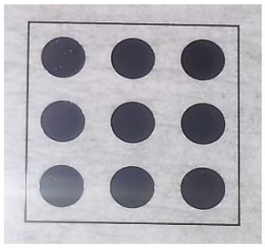
- Numunelerin aşındırma (etch) işleminde kullanılacak kimyasal çözeltiyi belirlemek için denemeler yapıldı, uygun çözelti bulundu.
- Numunelerin ön ve arka yüzeylerinde oluşturulacak omik kontaklar için iki farklı yöntem denendi. Bunlardan ilki olan Püskürtme (Sputtering) tekniği ile altın (Au) omik kontaklar, Vakum-Buharlaştırma tekniği ile AuNiGe omik kontaklar oluşturuldu.

A. Numunelerin Aşındırma İşlemi İçin Yapılan Çalışmalar

GS295 ve GS298 numunelerinin yaklaşık 10 nm kalınlığındaki katkısız GaP kep tabakasının kaldırılması için aşındırma çözeltisi belirlenmeye çalışıldı. Bunun için çeşitli kimyasal çözeltiler denendi. Numunelerin 5x5 mm boyutlarında kesilen birer parçası üzerine, Şekil 66'daki fotomaske kullanılarak fotolitografi işlemi yapıldı. Fotolitografi işleminde aşağıdaki adımlar izlendi:

a. Numuneler aseton ve alkol ile temizlendi, kuru azot ile kurutuldu.

b. Numuneler, dönel kaplama cihazında, 4000 rpm dönme hızı, 4 ramp ve 40 s döndürülerek, AZ5214E fotorezistinin numune yüzeyine homojen olarak kaplanması sağlandı.
c. Numuneler, ısıtıcı tabla üzerinde 110 °C'de 50 s ısıtılarak fotorezist üzerindeki çözücülerin buharlaşması ve böylece yüzeye daha iyi tutunması sağlandı.
d. MJB-4 Karl-Süss maske hizalama sistemi kullanılarak, Numune ve maske birbirlerine hizalandı, sert kontak modunda 20.5 s UV ışığa maruz bırakıldı.
e. 1 (AZ400K) : 4 (DI-H_2O) developer çözeltisinde 30 s bekletilerek ultraviyole (mor ötesi, UV) ışığa maruz kalan bölgelerin çözünmesi sağlandı. Böylece maskedeki desen numune yüzeyinde oluşturuldu.
f. Veeco Dektak-150 Profilometre Sistemi kullanılarak yüzeydeki fotorezist kalınlığı 1359 nm olarak ölçüldü.



Şekil 4.66. Fotomaske

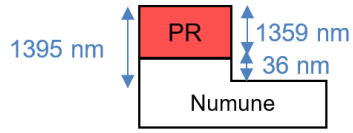
Numune yüzeyine kaplanan fotorezist malzemenin kimyasal çözeltilerde aşınma miktarı, numune ile kıyaslandığında önemsenmeyecek kadar azdır. Bu nedenle kalınlıkta meydana gelecek değişim numunenin aşındırma miktarını verecektir.

Literatürde (Clawson, 2001) GaP aşındırma işlemi için kullanılan çözeltilerden biri olan 1HCl:1HNO_3:4H_2O çözeltisinde 5 s bekletildi ve DI-H_2O ile durulandı, sonra tekrar aynı çözeltide 30 s daha bekletildi. Ancak profilometre ölçüm sonuçları, kalınlıkta değişim olmadığını yani aşındırma işleminin başarısız olduğunu gösterdi.

Aşındırma işlemi için kullanılan çözelti değiştirildi ve 1HCl:1HNO_3:2H_2O çözeltisi hazırlandı. Numune bu çözeltide 30 s bekletildi. Ancak profilometre ölçüm sonuçları, kalınlıkta değişim olmadığını yani aşındırma işleminin başarısız olduğunu gösterdi.

Tekrar aşındırma çözeltisi değiştirilerek 2HCl:1HNO_3:2H_2O çözeltisi hazırlandı. Numune, 60 °C de 75 s boyunca çözeltide bekletildi. DI-H_2O ile durulanıp kuru azot ile kurutuldu.

Profilometre sonucu, 1395 nm olarak ölçüldü ve numunenin yaklaşık 36 nm aşındırıldığı belirlendi (Şekil 4.67).



Şekil 4.67. Numunenin aşındırma işleminin şematik gösterimi

Numune, aynı çözelti ve 60 °C de 3 dakika bekletildi. Profilometre sonucu, 1540 nm olarak ölçüldü ve numunenin yaklaşık 181 nm aşındırıldığı görüldü. Yapılan aşındırma işlemleri sırasında GS298 (GaAsPN) numunesinin aynı çözeltide daha hızlı aşındığı görüldü. Bu yüzden GS298 numunelerinin daha kısa süre aşındırılmasına karar veridi. Numunelerin aşındırma işlemi için;

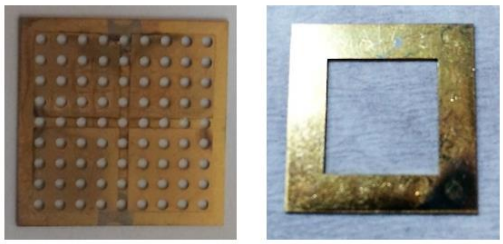
60 °C sıcaklıkta 2 HCl : 1 HNO_3 : 2 H_2O

çözeltisi belirlendi. Aşındırma çözeltisi belirlendikten sonra GS295 ve GS298 numunelerinin birer parçasının 10 nm kalınlığındaki kep tabakası kaldırıldı. Bu amaçla GS295 numunesi hazırlanan aşındırma çözeltisinde 30 s bekletildi. GS298 numunesi ise aynı çözeltide 5 s bekletildi.

B. Numunelerin Ön ve Arka Yüzeylerinde Omik Kontakların Oluşturulması

GS295 ve GS298 numunelerinin ön ve arka yüzeylerinde omik kontakların oluşturulması işlemi iki şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu işlemlerden ilki Püskürtme Tekniği ile altın omik kontakların oluşturulması, diğeri ise Vakum-Buharlaştırma tekniği ile AuNiGe omik kontakların oluşturulmasıdır.

a) Püskürtme Tekniği ile Au Omik Kontakların Oluşturulması: GS295 ve GS298 numunelerinden 5x5 mm boyutlarında ikişer parça hazırlandı. Birer parçanın kep tabakası aşındırma çözeltisi ile kaldırıldı, diğer parçalara aşındırma işlemi yapılmadı. Numuneler aseton ve alkol ile temizlendi, kuru azot ile kurutuldu. Numunelerin ön ve arka yüzeylerine kaplama yapıldı. Bu amaçla Şekil 4.68'deki maskeler kullanıldı. Öncelikle ön yüzey kaplaması için yuvarlak delikli maske kullanıldı. Maske numunelerin üzerine gelecek şekilde numune tutucuya sabitlenerek Püskürtme (Sputtering) sistemine yüklendi.



Şekil 4.68. Ön ve arka yüzey maskeleri

Ön yüzey Altın (Au) kaplama parametreleri;

P_{Base} (mbar)	6.8×10^{-7}
P_{Ar} (mbar)	2.1×10^{-3}
P_{DC} (W)	100
dist (mm)	90
GR(Au) (Å/s)	3.8
d_{Au} (Å)	1500
Ts	Oda sıcaklığı
FR_{Ar} (sccm)	12
P_{Base}: Taban basıncı P_{Ar}: Argon basıncı P_{DC}: DC-Güç dist: Hedef ile numune arasındaki mesafe	GR: büyütme oranı d_{Au}: Altın kalınlığı Ts: Alttaş sıcaklığı FR_{Ar}: Argon akışı

Numuneler sistemden çıkartıldı, arka yüzeyleri için maske hazırlandı ve tekrar Püskürtme cihazına yüklendi. Arka yüzey Altın (Au) kaplama parametreleri;

P_{Base} (mbar)	7.7×10^{-7}
P_{Ar} (mbar)	3.4×10^{-3}
P_{DC} (W)	100
dist (mm)	90
GR(Au) (Å/s)	3.4
d_{Au} (Å)	1500
Ts	Oda sıcaklığı
FR_{Ar} (sccm)	12
P_{Base}: Taban basıncı P_{Ar}: Argon basıncı P_{DC}: DC-Güç dist: Hedef ile numune arasındaki mesafe	GR: büyütme oranı d_{Au}: Altın kalınlığı Ts: Alttaş sıcaklığı FR_{Ar}: Argon akışı

Numuneler, omik kontak oluşturulması için N_2 ortamında 360 °C'de 10 dakika tavlandı.

b) Vakum-Buharlaştırma Tekniği ile AuNiGe Omik Kontakların Oluşturulması: GS295 ve GS298 numunelerinden 5x5 mm boyutlarında birer parça hazırlandı. Numunelerin kep tabakası kaldırılmadan (aşındırma yapılmadan) kontak oluşturma işlemleri gerçekleştirildi. Numuneler aseton ve alkol ile temizlendi, kuru azot ile kurutuldu. Numunelerin öncelikle ön yüzlerine kaplama yapıldı. Bu amaçla, önceki işlemde kullanılan maskeler kullanıldı. Maskeler numune üzerine hizalanarak Vakum-Buharlaştırma Sistemine yüklendi. GaP üzerine omik kontak oluşturulması için literatürde (Peternai, 2003) denenmiş AuNiGe alaşımı kullanıldı. Ön yüzey AuNiGe kaplama parametreleri;

P_{Base} (mbar)	1.37 x10^{-6}
$P_{kaplama}$ (mbar)	1.02 x10^{-5}
GR(AuNiGe) (Å/s)	2.0
d_{Au} (Å)	2000
Ts	Oda sıcaklığı
P_{Base}: Taban basıncı $P_{kaplama}$: Kaplama basıncı GR: büyütme oranı	d_{Au}: Altın kalınlığı Ts: Alttaş sıcaklığı

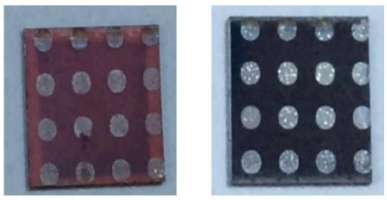
Numuneler sistemden çıkartıldı, arka yüzeyleri için maske hazırlandı ve tekrar Vakum-Buharlaştırma cihazına yüklendi. Arka yüzey AuNiGe kaplama parametreleri;

P_{Base} (mbar)	1.37 x10^{-6}
$P_{kaplama}$ (mbar)	1.02 x10^{-5}
GR(AuNiGe) (Å/s)	2.0
d_{Au} (Å)	2000
Ts	Oda sıcaklığı
P_{Base}: Taban basıncı $P_{kaplama}$: Kaplama basıncı GR: büyütme oranı	d_{Au}: Altın kalınlığı Ts: Alttaş sıcaklığı

Numuneler, omik kontak oluşturulması için hızlı ısıl tavlama (RTA) cihazında, N_2 ortamında tavlandı. Tavlama parametreleri;

P_{Base} (mbar)	5.3 x10^{-5}
P_{N2} (mbar)	2.12 x10^{-3}
Ts (^oC)	350
t (dakika)	5
P_{Base}: Taban basıncı P_{N2}: Azot basıncı	Ts: Alttaş sıcaklığı t: Tavlama süresi

Omik kontakları oluşturulmuş numunelere ait görseller Şekil 4.69'da verildi.



(a) (b)

Şekil 4.69. AuNiGe kontakları oluşturulmuş (a) GS295 ve (b) GS298 numuneleri

4.5.2 GS303 ve GS304 Numunelerinin Fabrikasyonu

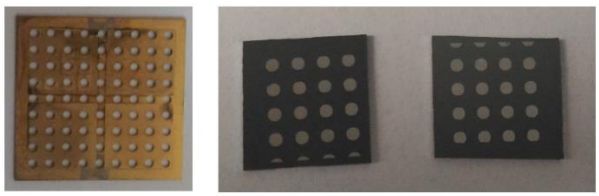
GaP ve Si alttaşlar üzerine MBE yöntemi ile büyütülen seyreltik azotlu tek-renkli GaAsPN LED yapıları olan GS303 ve GS304 numunelerinin LED aygıt fabrikasyonu için aşağıdaki işlemler yapıldı.

A. Numune Yüzeylerinde Omik Kontakların Oluşturulması

GS303 ve GS304 numunelerinden 10x10 mm boyutlarında kesilen ikişer parçanın ön ve arka yüzeylerinde omik kontaklar oluşturulması amacıyla Vakum-Buharlaştırma Sisteminde metalizasyon işlemi yapıldı.

a) Ön Yüzey AuZn Metalizasyonu: Numuneler aseton ve alkol ile temizlendi, kuru azot ile kurutuldu. Ön yüzey kontakları için Şekil 4.70(a)'da verilen yuvarlak delikli maske kullanıldı. Maske, numune üzerine hizalanarak Vakum-Buharlaştırma Cihazına yükledi. p-GaP üzerine omik kontak oluşturulmasında kullanılan AuZn alaşımı kullanıldı. Ön yüzey kontakları oluşturulmuş numune Şekil 4.70(b)'de verildi. Ön yüzey AuZn kaplama parametreleri;

P_{Base} (mbar)	4.09 x10^{-6}
$P_{kaplama}$ (mbar)	3.3 x10^{-5}
GR(AuZn) (Å/s)	1.7
d_{Au} (Å)	2000
Ts	Oda sıcaklığı
P_{Base}: Taban basıncı $P_{kaplama}$: Kaplama basıncı GR: büyütme oranı	d_{Au}: Altın kalınlığı Ts: Alttaş sıcaklığı

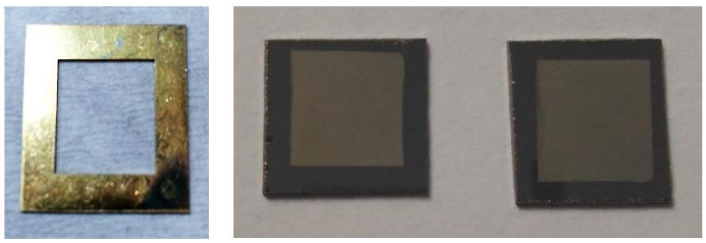


(a) (b)

Şekil 4.70. (a) Yuvarlak delikli maske ve (b) ön yüzey kontakları oluşturulmuş numuneler

b) Arka Yüzey AuNiGe Metalizasyonu: Arka yüzey kontakları için Şekil 4.71(a)'da verilen maske kullanıldı. Maske, numune üzerine hizalanarak Vakum-Buharlaştırma Cihazına yükledi. n-GaP üzerine omik kontak oluşturulmasında kullanılan AuNiGe alaşımı kullanıldı. Arka yüzey kontağı alınmış numune Şekil 4.71(b)'de verildi. Arka yüzey AuNiGe kaplama parametreleri;

P_{Base} (mbar)	4.8 x10^{-6}
$P_{kaplama}$ (mbar)	6.82 x10^{-5}
GR(AuNiGe) (Å/s)	1.8
d_{Au} (Å)	2000
Ts	Oda sıcaklığı
P_{Base}: Taban basıncı $P_{kaplama}$: Kaplama basıncı GR: büyütme oranı	d_{Au}: Altın kalınlığı Ts: Alttaş sıcaklığı



(a) (b)

Şekil 4.71. (a) Arka yüzey kontak maskesi ve (b) arka yüzey kontakları oluşturulmuş numuneler

Ön ve arka yüzeylerine metalizasyon yapılan numuneler, kontakların omik özellik göstermesi amacıyla hızlı ısıl tavlama (RTA) cihazında, N_2 ortamında tavlandı. Tavlama parametreleri;

P_{Base} (mbar)	3.2×10^{-5}
P_{N2} (mbar)	2.03×10^{-3}
Ts (^oC)	GS303 numunesi için 300, 350 ve 400 GS304 numunesi için 350 ve 400
t (dakika)	5
P_{Base}: Taban basıncı P_{N2}: Azot basıncı	Ts: Alttaş sıcaklığı t: Tavlama süresi

4.5.3 GS309, GS311, GS312 ve GS313 Seyreltik Azotlu Kuantum Kuyulu GaAsPN/GaPN LED Numunelerinin Fabrikasyonu

Kuantum kuyu yapısına sahip olarak büyütülen GS309, GS311, GS312 ve GS313 numunelerine LED aygıt fabrikasyonu yapıldı. İzlenen işlem adımları aşağıdaki gibi özetlendi.

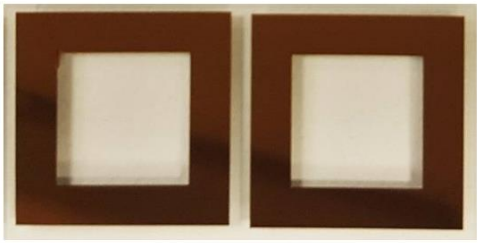
- Numunelerin ön ve arka yüzeylerinde oluşturulacak omik kontaklar için fotolitografi işlemi yapıldı.
- Numunelerin arka yüzey kontakları için AuNiGe alaşımı, ön yüzey kontakları için ise AuZn alaşımı Vakum-Buharlaştırma sistemi kullanılarak kaplandı.

A. Numunelerin Arka Yüzey Fotolitografi ve Kontak Metalizasyon İşlemleri

a) Numunelerin Arka Yüzey Kontak Fotolitografi İşlemi: İlk olarak, numunelerin 10x10 mm boyutlarında kesilen birer parçası üzerine, Şekil 4.72'de verilen fotomaske kullanılarak arka yüzey kontak fotolitografi işlemi yapıldı. Fotolitografi işleminde aşağıdaki adımlar izlendi;

a. Numuneler aseton ve alkol ile temizlendi, kuru azot ile kurutuldu.

b. Numuneler, dönel kaplama cihazında 4000 rpm dönme hızı, 4 ramp ve 40 s döndürülerek, AZ5214E fotorezistinin numune yüzeyine homojen olarak kaplanması sağlandı.
c. Numuneler, sıcak yüzey üzerinde 110 °C de 50 s ısıtılarak fotorezist üzerindeki çözücülerin buharlaşması ve böylece yüzeye daha iyi tutunması sağlandı.
d. MJB-4 Karl-Süss maske hizalama cihazı kullanılarak, Numune ve maske birbirlerine hizalandı, sert kontak modunda 20.5 s UV ışığa maruz bırakıldı.
e. 1 (AZ400K) : 4 (DI-H_2O) developer çözeltisinde 30 s bekletilerek UV ışığa maruz kalan bölgelerin çözünmesi sağlandı. Böylece maskedeki desen numune yüzeyinde oluşturuldu.

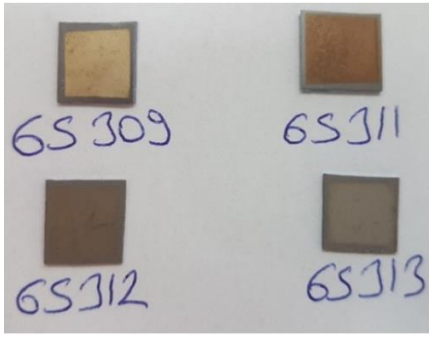


Şekil 4.72. Arka Yüzey Kontak Fotomaskesi

b) Numunelerin Arka Yüzey Kontak Metalizasyonu: Numunelerin arka yüzey kontak metalizasyonu, vakum-buharlaştırma sisteminde AuNiGe alaşımı kullanılarak gerçekleştirildi. Numuneler, vakum-buharlaştırma sistemine yüklendikten sonra kaplama için aşağıdaki parametreler kullanıldı.

P_{Base} (mbar)	1.75 x10^{-5}
$P_{kaplama}$ (mbar)	1.26 x10^{-4}
GR(AuNiGe) (Å/s)	2.0
d_{AuNiGe} (Å)	2000
Ts	Oda sıcaklığı
P_{Base}: Taban basıncı $P_{kaplama}$: Kaplama basıncı	GR: büyütme oranı d: Kalınlık Ts: Alttaş sıcaklığı

Metalizasyon işleminin ardından, numuneler aseton ile temizlenerek yüzeydeki fotorezist malzemenin kalkması sağlandı. Böylece arka yüzey kontak alma işlemi tamamlandı. Arka yüzey kontakları alınmış numuneler Şekil 4.73'de verildi.

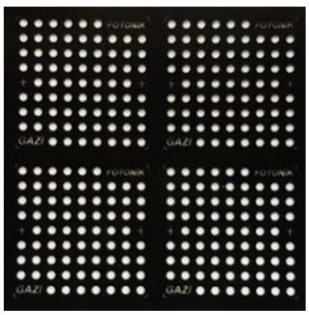


Şekil 4.73. Arka Yüzey Kontakları Oluşturulmuş Numuneler

B. Numunelerin Ön Yüzey Fotolitografi ve Kontak Metalizasyon İşlemleri

a) Numunelerin Ön Yüzey Kontak Litografi İşlemi: Arka yüzey kontakları oluşturulan numunelere Şekil 4.74'de verilen fotomaske kullanılarak ön yüzey kontak fotolitografi işlemi yapıldı. Fotolitografi işleminde aşağıdaki adımlar izlendi;

a. Numuneler aseton ve alkol ile temizlendi, kuru azot ile kurutuldu.
b. Numuneler, dönel kaplama cihazında 4000 rpm dönme hızı, 4 ramp ve 40 s döndürülerek, AZ5214E fotorezistinin numune yüzeyine homojen olarak kaplanması sağlandı.
c. Numuneler, sıcak yüzey üzerinde 110 °C de 50 s ısıtılarak fotorezist üzerindeki çözücülerin buharlaşması ve böylece yüzeye daha iyi tutunması sağlandı.
d. MJB-4 Karl-Süss maske hizalama cihazı kullanılarak, Numune ve maske birbirlerine hizalandı, sert kontak modunda 20.5 s UV ışığa maruz bırakıldı.
e. 1 (AZ400K) : 4 (DI-H_2O) developer çözeltisinde 30 s bekletilerek UV ışığa maruz kalan bölgelerin çözünmesi sağlandı. Böylece maskedeki desen numune yüzeyinde oluşturuldu.



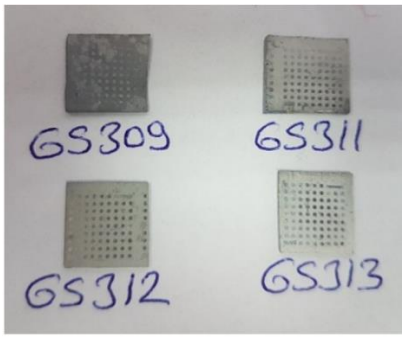
Şekil 4.74. Ön Yüzey Kontak Fotomaskesi

b) Numunelerin Ön Yüzey Kontak Metalizasyonu: Numunelerin ön yüzey kontak metalizasyonu, vakum-buharlaştırma sisteminde AuZn alaşımı kullanılarak gerçekleştirildi.

Numuneler, vakum-buharlaştırma sistemine yüklendikten sonra kaplama için aşağıdaki parametreler kullanıldı.

P_{Base} (mbar)	5.20 x10^{-5}
$P_{kaplama}$ (mbar)	1.28 x10^{-4}
GR(AuZn) (Å/s)	2.0
d_{AuNiGe} (Å)	2000
Ts	Oda sıcaklığı
P_{Base}: Taban basıncı $P_{kaplama}$: Kaplama basıncı	GR: büyütme oranı d: Kalınlık Ts: Alttaş sıcaklığı

Metalizasyon işleminin ardından, numuneler aseton ile temizlenerek yüzeydeki fotorezist malzemenin kalkması sağlandı. Böylece ön yüzey kontak alma işlemi tamamlandı. Ön yüzey kontakları alınmış numuneler Şekil 4.75'de verildi.



Şekil 4.75. Ön Yüzey Kontakları Oluşturulmuş Numuneler

Ön ve arka yüzeylerine kontak metalizasyonları tamamlanan numuneler, ohmik kontak oluşturulması amacıyla hızlı ısıl tavlama (RTA) sisteminde, N_2 ortamında tavlandı. Tavlama parametreleri;

P_{Base} (mbar)	5.20 x10^{-5}
$P_{tavlama}$ (mbar)	1.28 x10^{-4}
t (dakika)	5
$T_{tavlama}$ (°C)	350
P_{Base}: Taban basıncı $P_{tavlama}$: Tavlama basıncı	t: Tavlama süresi $T_{tavlama}$: Tavlama sıcaklığı

4.5.4 GS322, GS323, GS324 ve GS325 Seyreltik Azotlu İki-renkli GaAsPN LED Numunelerinin Fabrikasyonu

A. GS322 ve GS324 Numunelerinin LED Fabrikasyonu

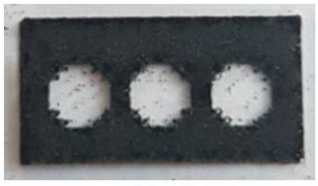
İki renkli seri LED biçiminde büyütülen GS322 ve GS324 numunelerinin LED aygıt fabrikasyonu yapıldı. İzlenen işlem adımları aşağıdaki gibi özetlendi.

A. Numunelerin ön ve arka yüzeylerinde oluşturulacak omik kontaklar için fotolitografi işlemi yapıldı.
B. GS322 numunesinin arka kontakları için n-GaP Tampon tabakasına kadar aşındırma işlemi gerçekleştirildi.
C. Numunelerin arka kontakları için AuNiGe alaşımı, ön kontakları için ise AuZn alaşımı Vakum-Buharlaştırma sistemi kullanılarak kaplandı.

A1. GS322 Numunesinin Fotolitografi ve Metalizasyon İşlemleri

A1.1. Arka Kontak Fotolitografi İşlemi: Numunenin 10x10 mm boyutlarında kesilmiş parçasının arka kontakları n-GaP tampon tabakadan alınacağı için bu katmana kadar yaklaşık 2420 nm aşındırma işlemi yapıldı. Aşındırma işleminde önce arka kontakların alınacağı bölgenin dışında kalan yerler fotorezist malzeme ile kaplandı. Aşındırma işlemi için $2HCl:1HNO_3:5H_2O$ çözeltisi kullanıldı. Aşındırılmış yüzey üzerine Şekil 4.76'da verilen fotomaske kullanılarak arka kontak fotolitografi işlemi yapıldı. Fotolitografi işleminde aşağıdaki adımlar izlendi;

a. Numune aseton ve alkol ile temizlendi, kuru azot ile kurutuldu.
b. Numune, dönel kaplama cihazında 4000 rpm dönme hızı, 4 ramp ve 40 s döndürülerek, AZ5214E fotorezistinin numune yüzeyine homojen olarak kaplanması sağlandı.
c. Numune, sıcak yüzey üzerinde 110 °C de 50 s ısıtılarak fotorezist üzerindeki çözücülerin buharlaşması ve böylece yüzeye daha iyi tutunması sağlandı.
d. MJB-4 Karl-Süss maske hizalama cihazı kullanılarak, Numune ve maske birbirlerine hizalandı, sert kontak modunda 20.5 s UV ışığa maruz bırakıldı.
e. 1 (AZ400K) : 4 (DI-H_2O) developer çözeltisinde 30 s bekletilerek UV ışığa maruz kalan bölgelerin çözünmesi sağlandı. Böylece maskedeki desen numune yüzeyinde oluşturuldu.



Şekil 4.76. Arka Kontak Fotomaskesi

A1.2. Arka Kontak Metalizasyonu: Numunenin arka kontak metalizasyonu, vakum-buharlaştırma sisteminde AuNiGe alaşımı kullanılarak gerçekleştirildi. Numune, vakum-buharlaştırma sistemine yüklendikten sonra kaplama için aşağıdaki parametreler kullanıldı.

P_{Base} (mbar)	5.50 x10^{-5}
$P_{kaplama}$ (mbar)	2.0 x10^{-4}
GR(AuNiGe) (Å/s)	1.9
d_{AuNiGe} (Å)	2000
Ts	Oda sıcaklığı
P_{Base}: Taban basıncı $P_{kaplama}$: Kaplama basıncı	GR: büyütme oranı d: Kalınlık Ts: Alttaş sıcaklığı

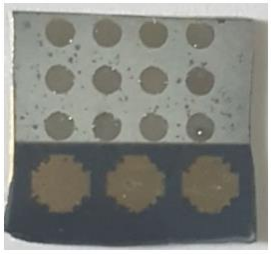
A1.3. Ön Yüzey Kontak Fotolitografi İşlemi: Arka kontakları oluşturulan numuneye Şekil 4.74'de verilen fotomaske kullanılarak ön yüzey kontak fotolitografi işlemi yapıldı. Fotolitografi işleminde aşağıdaki adımlar izlendi;

a. Numune aseton ve alkol ile temizlendi, kuru azot ile kurutuldu.
b. Numune, dönel kaplama cihazında 4000 rpm dönme hızı, 4 ramp ve 40 s döndürülerek, AZ5214E fotorezistinin numune yüzeyine homojen olarak kaplanması sağlandı.
c. Numune, sıcak yüzey üzerinde 110 °C de 50 s ısıtılarak fotorezist üzerindeki çözücülerin buharlaşması ve böylece yüzeye daha iyi tutunması sağlandı.
d. MJB-4 Karl-Süss maske hizalama cihazı kullanılarak, Numune ve maske birbirlerine hizalandı, sert kontak modunda 20.5 s UV ışığa maruz bırakıldı.
e. 1 (AZ400K) : 4 (DI-H_2O) developer çözeltisinde 30 s bekletilerek UV ışığa maruz kalan bölgelerin çözünmesi sağlandı. Böylece maskedeki desen numune yüzeyinde oluşturuldu.

A1.4. Ön Yüzey Kontak Metalizasyonu: Numunenin ön kontak metalizasyonu, vakum-buharlaştırma sisteminde AuZn alaşımı kullanılarak gerçekleştirildi. Numune, vakum-buharlaştırma sistemine yüklendikten sonra kaplama için aşağıdaki parametreler kullanıldı.

P_{Base} (mbar)	5.72 x10^{-5}
$P_{kaplama}$ (mbar)	1.44 x10^{-4}
GR(AuZn) (Å/s)	2.0
d_{AuZn} (Å)	2000
Ts	Oda sıcaklığı
P_{Base}: Taban basıncı $P_{kaplama}$: Kaplama basıncı	GR: büyütme oranı d: Kalınlık Ts: Alttaş sıcaklığı

Metalizasyon işleminin ardından, numune aseton ile temizlenerek yüzeydeki fotorezist malzemenin kalkması sağlandı. Böylece numunenin kontak alma işlemi tamamlandı. Aynı yüzey üzerinden ön ve arka kontakları alınmış numune Şekil 4.77'de verildi.



Şekil 4.77. Aynı Yüzey Üzerinde Ön ve Arka Kontakları Oluşturulmuş Numune

Kontak metalizasyonu tamamlanan numune, omik kontak oluşturulması amacıyla hızlı ısıl tavlama (RTA) sisteminde, N_2 ortamında tavlandı. Tavlama parametreleri;

P_{Base} (mbar)	3.15×10^{-5}
$P_{tavlama}$ (mbar)	2.95×10^{-4}
t (dakika)	3
$T_{tavlama}$ (°C)	350
P_{Base}: Taban basıncı $P_{tavlama}$: Tavlama basıncı	t: Tavlama süresi $T_{tavlama}$: Tavlama sıcaklığı

A2) GS324 Numunesinin Fotolitografi ve Metalizasyon İşlemleri

A2.1. Arka Yüzey Kontak Fotolitografi İşlemi: Numunenin 10x10 mm boyutlarında kesilmiş parçası üzerine, Şekil 4.72'de verilen fotomaske kullanılarak arka yüzey kontak fotolitografi işlemi yapıldı. Fotolitografi işleminde aşağıdaki adımlar izlendi;

a. Numune aseton ve alkol ile temizlendi, kuru azot ile kurutuldu.
b. Numune, dönel kaplama cihazında 4000 rpm dönme hızı, 4 ramp ve 40 s döndürülerek, AZ5214E fotorezistinin numune yüzeyine homojen olarak kaplanması sağlandı.
c. Numune, sıcak yüzey üzerinde 110 °C de 50 s ısıtılarak fotorezist üzerindeki çözücülerin buharlaşması ve böylece yüzeye daha iyi tutunması sağlandı.
d. MJB-4 Karl-Süss maske hizalama cihazı kullanılarak, numune ve maske birbirlerine hizalandı, sert kontak modunda 20.5 s UV ışığa maruz bırakıldı.
e. 1 (AZ400K) : 4 (DI-H_2O) developer çözeltisinde 30 s bekletilerek UV ışığa maruz kalan bölgelerin çözünmesi sağlandı. Böylece maskedeki desen numune yüzeyinde oluşturuldu.

A2.2. Arka Yüzey Kontak Metalizasyonu: Numunenin arka yüzey kontak metalizasyonu, vakum-buharlaştırma sisteminde AuNiGe alaşımı kullanılarak gerçekleştirildi. Numune, vakum-buharlaştırma sistemine yüklendikten sonra kaplama için aşağıdaki parametreler kullanıldı.

P_{Base} (mbar)	5.20 x10^{-5}
$P_{kaplama}$ (mbar)	7.82 x10^{-5}
GR(AuNiGe) (Å/s)	1.9
d_{AuNiGe} (Å)	2000
Ts	Oda sıcaklığı
P_{Base}: Taban basıncı $P_{kaplama}$: Kaplama basıncı	GR: büyütme oranı d: Kalınlık Ts: Alttaş sıcaklığı

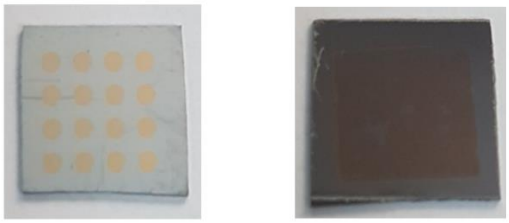
A2.3. Ön Yüzey Kontak Fotolitografi İşlemi: Arka yüzey kontakları oluşturulan numuneye Şekil 4.74'de verilen fotomaske kullanılarak ön yüzey kontak fotolitografi işlemi yapıldı. Fotolitografi işleminde aşağıdaki adımlar izlendi;

a. Numune aseton ve alkol ile temizlendi, kuru azot ile kurutuldu.
b. Numune, dönel kaplama cihazında 4000 rpm dönme hızı, 4 ramp ve 40 s döndürülerek, AZ5214E fotorezistinin numune yüzeyine homojen olarak kaplanması sağlandı.
c. Numune, sıcak yüzey üzerinde 110 °C de 50 s ısıtılarak fotorezist üzerindeki çözücülerin buharlaşması ve böylece yüzeye daha iyi tutunması sağlandı.
d. MJB-4 Karl-Süss maske hizalama cihazı kullanılarak, Numune ve maske birbirlerine hizalandı, sert kontak modunda 20.5 s UV ışığa maruz bırakıldı.
e. 1 (AZ400K) : 4 (DI-H_2O) developer çözeltisinde 30 s bekletilerek UV ışığa maruz kalan bölgelerin çözünmesi sağlandı. Böylece maskedeki desen numune yüzeyinde oluşturuldu.

A2.4. Ön Yüzey Kontak Metalizasyonu: Numunenin ön yüzey kontak metalizasyonu, vakum-buharlaştırma sisteminde AuZn alaşımı kullanılarak gerçekleştirildi. Numune, vakum-buharlaştırma sistemine yüklendikten sonra kaplama için aşağıdaki parametreler kullanıldı.

P_{Base} (mbar)	5.35 x10^{-5}
$P_{kaplama}$ (mbar)	7.95 x10^{-5}
GR(AuZn) (Å/s)	2.0
d_{AuZn} (Å)	2000
Ts	Oda sıcaklığı
P_{Base}: Taban basıncı $P_{kaplama}$: Kaplama basıncı	GR: büyütme oranı d: Kalınlık Ts: Alttaş sıcaklığı

Metalizasyon işleminin ardından, numune aseton ile temizlenerek yüzeydeki fotorezist malzemenin kalkması sağlandı. Böylece numunenin kontak alma işlemi tamamlandı. Ön ve arka yüzey kontakları alınmış numune Şekil 4.78'de verildi.



(a) (b)

Şekil 4.78. (a) Ön ve (b) Arka Yüzey Kontakları Oluşturulmuş Numune

B. GS323 ve GS325 Numunelerinin LED Fabrikasyonu

İki renkli paralel LED biçiminde büyütülmüş GS323 ve GS325 numunelerinin LED aygıt fabrikasyonu yapıldı. İzlenen işlem adımları aşağıdaki gibi özetlendi.

A. Numunelerin 1.LED ve 2.LED kontaklarını oluşturmak için fotolitografi işlemi yapıldı.
B. GS325 numunesinde 1.LED üst kontağı (numunenin orta kontağı) için p-GaAsPN tabakasına kadar aşındırma işlemi uygulandı.
C. GS323 numunesinde alt kontak için n-GaP Tampon tabakaya, 1.LED üst kontağı (numunenin orta kontağı) için ise p-GaAsPN tabakasına kadar aşındırma işlemi uygulandı.
D. Numunelerin alt ve üst kontakları için AuNiGe alaşımı, orta kontaklar için ise AuZn alaşımı Vakum-Buharlaştırma sistemi kullanılarak kaplandı.

B1. GS323 Numunesinin Fotolitografi ve Metalizasyon İşlemleri

B1.1. Arka Kontak Fotolitografi İşlemi: Numunenin 11x18 mm boyutlarında kesilmiş parçasının arka kontakları n-GaP tampon tabakadan alınacağı için bu katmana kadar yaklaşık 2420 nm aşındırma işlemi yapıldı. Aşındırma işleminde önce arka kontakların alınacağı bölgenin dışında kalan yerler fotorezist malzeme ile kaplandı. Aşındırma işlemi için $2HCl{:}1HNO_3{:}5H_2O$ çözeltisi kullanıldı. Aşındırılmış yüzey üzerine Şekil 4.76'da verilen fotomaske kullanılarak arka kontak fotolitografi işlemi yapıldı. Fotolitografi işleminde aşağıdaki adımlar izlendi;

a. Numune aseton ve alkol ile temizlendi, kuru azot ile kurutuldu.
b. Numune, dönel kaplama cihazında 4000 rpm dönme hızı, 4 ramp ve 40 s. döndürülerek, AZ5214E fotorezistinin numune yüzeyine homojen olarak kaplanması sağlandı.
c. Numune, sıcak yüzey üzerinde 110 °C de 50 s ısıtılarak fotorezist üzerindeki çözücülerin buharlaşması ve böylece yüzeye daha iyi tutunması sağlandı.

d. MJB-4 Karl-Süss maske hizalama cihazı kullanılarak, Numune ve maske birbirlerine hizalandı, sert kontak modunda 20.5 s UV ışığa maruz bırakıldı.
e. 1 (AZ400K) : 4 (DI-H_2O) developer çözeltisinde 30 s bekletilerek UV ışığa maruz kalan bölgelerin çözünmesi sağlandı. Böylece maskedeki desen numune yüzeyinde oluşturuldu.

B1.2. Arka Kontak Metalizasyonu: Numunenin arka kontak metalizasyonu, vakum-buharlaştırma sisteminde AuNiGe alaşımı kullanılarak gerçekleştirildi. Numune, vakum-buharlaştırma sistemine yüklendikten sonra kaplama için aşağıdaki parametreler kullanıldı.

P_{Base} (mbar)	5.12 x10^{-5}
$P_{kaplama}$ (mbar)	1.52 x10^{-4}
GR(AuNiGe) (Å/s)	1.9
d_{AuNiGe} (Å)	2000
Ts	Oda sıcaklığı
P_{Base}: Taban basıncı $P_{kaplama}$: Kaplama basıncı	GR: büyütme oranı d: Kalınlık Ts: Alttaş sıcaklığı

B1.3. Orta Kontak Fotolitografi İşlemi: Numunenin orta kontakları p-GaAsPN tabakasından alınacağı için bu katmana kadar yaklaşık 1220 nm aşındırma işlemi yapıldı. Aşındırma işleminde önce orta kontakların alınacağı bölgenin dışında kalan yerler fotorezist malzeme ile kaplandı. Aşındırma işlemi için 2HCl:1HNO_3:5H_2O çözeltisi kullanıldı. Aşındırılmış yüzey üzerine Şekil 4.76'da verilen fotomaske kullanılarak orta kontak fotolitografi işlemi yapıldı. Fotolitografi işleminde aşağıdaki adımlar izlendi;

a. Numune aseton ve alkol ile temizlendi, kuru azot ile kurutuldu.
b. Numune, dönel kaplama cihazında 4000 rpm dönme hızı, 4 ramp ve 40 s döndürülerek, AZ5214E fotorezistinin numune yüzeyine homojen olarak kaplanması sağlandı.
c. Numune, sıcak yüzey üzerinde 110 °C de 50 s ısıtılarak fotorezist üzerindeki çözücülerin buharlaşması ve böylece yüzeye daha iyi tutunması sağlandı.
d. MJB-4 Karl-Süss maske hizalama cihazı kullanılarak, Numune ve maske birbirlerine hizalandı, sert kontak modunda 20.5 s UV ışığa maruz bırakıldı.
e. 1 (AZ400K) : 4 (DI-H_2O) developer çözeltisinde 30 s bekletilerek UV ışığa maruz kalan bölgelerin çözünmesi sağlandı. Böylece maskedeki desen numune yüzeyinde oluşturuldu.

B1.4. Orta Kontak Metalizasyonu: Numunenin orta kontak metalizasyonu, vakum-buharlaştırma sisteminde AuZn alaşımı kullanılarak gerçekleştirildi. Numune, vakum-buharlaştırma sistemine yüklendikten sonra kaplama için aşağıdaki parametreler kullanıldı.

P_{Base} (mbar)	5.23×10^{-5}
$P_{kaplama}$ (mbar)	1.41×10^{-4}
GR(AuZn) (Å/s)	2.0
d_{AuZn} (Å)	2000
Ts	Oda sıcaklığı
P_{Base}: Taban basıncı $P_{kaplama}$: Kaplama basıncı	GR: büyütme oranı d: Kalınlık Ts: Alttaş sıcaklığı

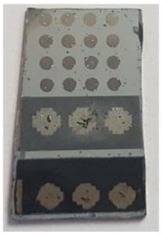
B1.5. Ön Yüzey Kontak Fotolitografi İşlemi: Orta ve arka kontakları oluşturulan numuneye Şekil 4.72'de verilen fotomaske kullanılarak ön yüzey kontak fotolitografi işlemi yapıldı. Fotolitografi işleminde aşağıdaki adımlar izlendi;

a. Numune aseton ve alkol ile temizlendi, kuru azot ile kurutuldu.
b. Numune, dönel kaplama cihazında 4000 rpm dönme hızı, 4 ramp ve 40 s döndürülerek, AZ5214E fotorezistinin numune yüzeyine homojen olarak kaplanması sağlandı.
c. Numune, sıcak yüzey üzerinde 110 °C de 50 s ısıtılarak fotorezist üzerindeki çözücülerin buharlaşması ve böylece yüzeye daha iyi tutunması sağlandı.
d. MJB-4 Karl-Süss maske hizalama cihazı kullanılarak, Numune ve maske birbirlerine hizalandı, sert kontak modunda 20.5 s UV ışığa maruz bırakıldı.
e. 1 (AZ400K) : 4 (DI-H_2O) developer çözeltisinde 30 s bekletilerek UV ışığa maruz kalan bölgelerin çözünmesi sağlandı. Böylece maskedeki desen numune yüzeyinde oluşturuldu.

B1.6. Ön Yüzey Kontak Metalizasyonu: Numunenin ön kontak metalizasyonu, vakum-buharlaştırma sisteminde AuNiGe alaşımı kullanılarak gerçekleştirildi. Numune, vakum-buharlaştırma sistemine yüklendikten sonra kaplama için aşağıdaki parametreler kullanıldı.

P_{Base} (mbar)	3.11×10^{-5}
$P_{kaplama}$ (mbar)	8.51×10^{-5}
GR(AuZn) (Å/s)	2.1
d_{AuNiGe} (Å)	2000
Ts	Oda sıcaklığı
P_{Base}: Taban basıncı $P_{kaplama}$: Kaplama basıncı	GR: büyütme oranı d: Kalınlık Ts: Alttaş sıcaklığı

Metalizasyon işleminin ardından, numune aseton ile temizlenerek yüzeydeki fotorezist malzemenin kalkması sağlandı. Böylece numunenin kontak alma işlemi tamamlandı. Aynı yüzey üzerinden ön, orta ve arka kontakları alınmış numune Şekil 4.79'da verildi.



Şekil 4.79. Aynı Yüzeyde Ön, Orta ve Arka Kontakları Oluşturulmuş Numune

B2. GS325 Numunesinin Fotolitografi ve Metalizasyon İşlemleri

B2.1. Arka Yüzey Kontak Fotolitografi İşlemi: Numunenin 10x10 mm boyutlarında kesilmiş parçası üzerine, Şekil 4.72'de verilen fotomaske kullanılarak arka yüzey kontak fotolitografi işlemi yapıldı. Fotolitografi işleminde aşağıdaki adımlar izlendi;

a. Numune aseton ve alkol ile temizlendi, kuru azot ile kurutuldu.
b. Numune, dönel kaplama cihazında 4000 rpm dönme hızı, 4 ramp ve 40 s döndürülerek, AZ5214E fotorezistinin numune yüzeyine homojen olarak kaplanması sağlandı.
c. Numune, sıcak yüzey üzerinde 110 °C de 50 s ısıtılarak fotorezist üzerindeki çözücülerin buharlaşması ve böylece yüzeye daha iyi tutunması sağlandı.
d. MJB-4 Karl-Süss maske hizalama cihazı kullanılarak, Numune ve maske birbirlerine hizalandı, sert kontak modunda 20.5 s UV ışığa maruz bırakıldı.
e. 1 (AZ400K) : 4 (DI-H_2O) developer çözeltisinde 30 s bekletilerek UV ışığa maruz kalan bölgelerin çözünmesi sağlandı. Böylece maskedeki desen numune yüzeyinde oluşturuldu.

B2.2. Arka Yüzey Kontak Metalizasyonu: Numunenin arka yüzey kontak metalizasyonu, vakum-buharlaştırma sisteminde AuNiGe alaşımı kullanılarak gerçekleştirildi. Numune, vakum-buharlaştırma sistemine yüklendikten sonra kaplama için aşağıdaki parametreler kullanıldı.

P_{Base} (mbar)	4.12×10^{-5}
$P_{kaplama}$ (mbar)	1.40×10^{-4}
GR(AuNiGe) (Å/s)	2.0
d_{AuNiGe} (Å)	2000
Ts	Oda sıcaklığı
P_{Base}: Taban basıncı $P_{kaplama}$: Kaplama basıncı	GR: büyütme oranı d: Kalınlık Ts: Alttaş sıcaklığı

B2.3. Orta Kontak Fotolitografi İşlemi: Numunenin orta kontakları p-GaAsPN tabakasından alınacağı için bu katmana kadar yaklaşık 1220 nm aşındırma işlemi yapıldı. Aşındırma işleminde önce orta kontakların alınacağı bölgenin dışında kalan yerler fotorezist malzeme ile kaplandı. Aşındırma işlemi için $2HCl:1HNO_3:5H_2O$ çözeltisi kullanıldı. Aşındırılmış yüzey üzerine Şekil 4.76'da verilen fotomaske kullanılarak orta kontak fotolitografi işlemi, aşağıdaki adımlar izlenerek gerçekleştirildi.

a. Numune aseton ve alkol ile temizlendi, kuru azot ile kurutuldu.
b. Numune, dönel kaplama cihazında 4000 rpm dönme hızı, 4 ramp ve 40 s döndürülerek, AZ5214E fotorezistinin numune yüzeyine homojen olarak kaplanması sağlandı.
c. Numune, sıcak yüzey üzerinde 110 °C de 50 s ısıtılarak fotorezist üzerindeki çözücülerin buharlaşması ve böylece yüzeye daha iyi tutunması sağlandı.
d. MJB-4 Karl-Süss maske hizalama cihazı kullanılarak, Numune ve maske birbirlerine hizalandı, sert kontak modunda 20.5 s UV ışığa maruz bırakıldı.
e. 1 (AZ400K) : 4 (DI-H_2O) developer çözeltisinde 30 s bekletilerek UV ışığa maruz kalan bölgelerin çözünmesi sağlandı. Böylece maskedeki desen numune yüzeyinde oluşturuldu.

B2.4. Orta Kontak Metalizasyonu: Numunenin orta kontak metalizasyonu, vakum-buharlaştırma sisteminde AuZn alaşımı kullanılarak gerçekleştirildi. Numune, vakum-buharlaştırma sistemine yüklendikten sonra kaplama için aşağıdaki parametreler kullanıldı.

P_{Base} (mbar)	6.20×10^{-5}
$P_{kaplama}$ (mbar)	1.22×10^{-4}
GR(AuZn) (Å/s)	2.0
d_{AuZn} (Å)	2000
Ts	Oda sıcaklığı
P_{Base}: Taban basıncı $P_{kaplama}$: Kaplama basıncı	GR: büyütme oranı d: Kalınlık Ts: Alttaş sıcaklığı

B2.5. Ön Yüzey Kontak Fotolitografi İşlemi: Orta ve arka kontakları oluşturulan numuneye Şekil 4.74'de verilen fotomaske kullanılarak ön yüzey kontak fotolitografi işlemi yapıldı. Fotolitografi işleminde aşağıdaki adımlar izlendi;

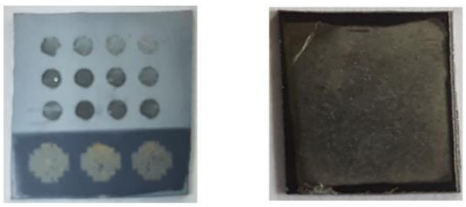
a. Numune aseton ve alkol ile temizlendi, kuru azot ile kurutuldu.
b. Numune, dönel kaplama cihazında 4000 rpm dönme hızı, 4 ramp ve 40 s döndürülerek, AZ5214E fotorezistinin numune yüzeyine homojen olarak kaplanması sağlandı.

c. Numune, sıcak yüzey üzerinde 110 °C de 50 s ısıtılarak fotorezist üzerindeki çözücülerin buharlaşması ve böylece yüzeye daha iyi tutunması sağlandı.
d. MJB-4 Karl-Süss maske hizalama cihazı kullanılarak, Numune ve maske birbirlerine hizalandı, sert kontak modunda 20.5 s UV ışığa maruz bırakıldı.
e. 1 (AZ400K) : 4 (DI-H_2O) developer çözeltisinde 30 s bekletilerek UV ışığa maruz kalan bölgelerin çözünmesi sağlandı. Böylece maskedeki desen numune yüzeyinde oluşturuldu.

B2.6. Ön Yüzey Kontak Metalizasyonu: Numunenin ön kontak metalizasyonu, vakum-buharlaştırma sisteminde AuNiGe alaşımı kullanılarak gerçekleştirildi. Numune, vakum-buharlaştırma sistemine yüklendikten sonra kaplama için aşağıdaki parametreler kullanıldı.

P_{Base} (mbar)	3.11 x10^{-5}
$P_{kaplama}$ (mbar)	8.51 x10^{-5}
GR(AuZn) (Å/s)	2.1
d_{AuNiGe} (Å)	2000
Ts	Oda sıcaklığı
P_{Base}: Taban basıncı $P_{kaplama}$: Kaplama basıncı	GR: büyütme oranı d: Kalınlık Ts: Alttaş sıcaklığı

Metalizasyon işleminin ardından, numune aseton ile temizlenerek yüzeydeki fotorezist malzemenin kalkması sağlandı. Böylece numunenin kontak alma işlemi tamamlandı. Aynı yüzey üzerinden ön ve orta kontakları alınmış numune Şekil 4.80'de verildi.



(a) (b)

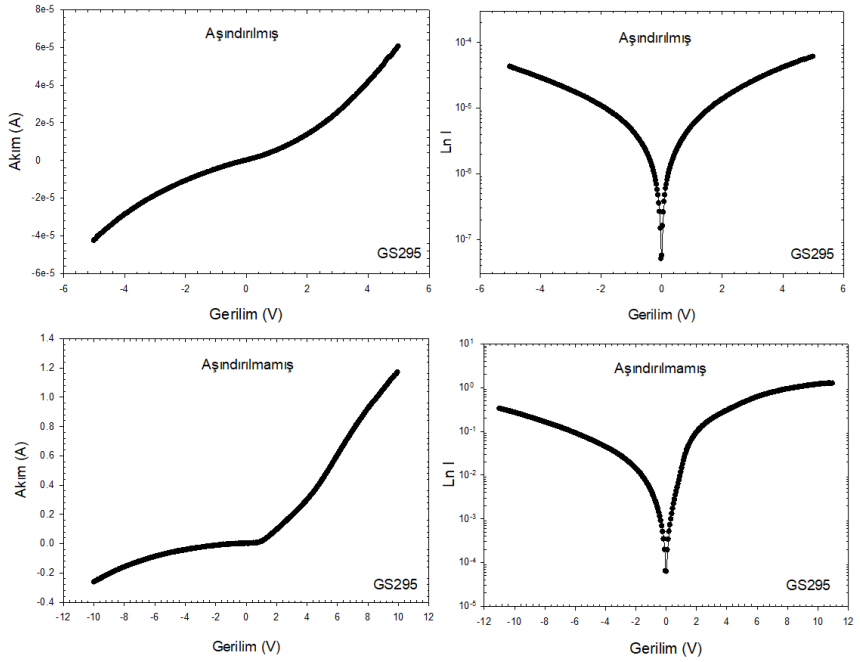
Şekil 4.80. (a) Ön, Orta ve (b) Arka Kontakları Oluşturulmuş Numune

4.6 Aygıt Karakterizasyonu: LED Aygıt Prototiplerinin Çıktı Parametrelerinin Ölçülmesi ve Analizleri

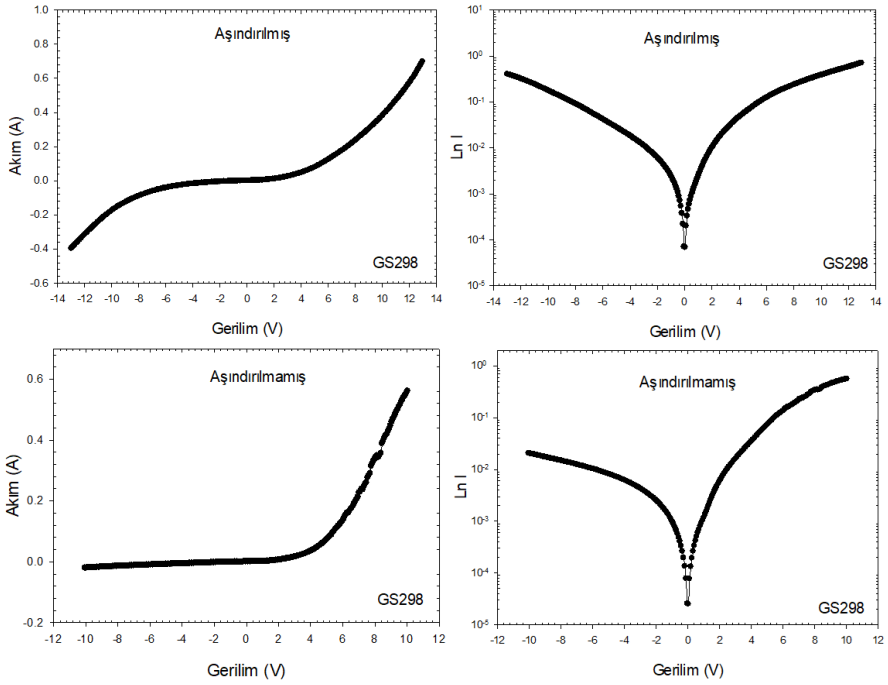
Fabrikasyonları tamamlanan LED aygıtlarının Keithley 4200 ölçüm sistemi kullanılarak akım-gerilim (I-V) ölçümleri alınarak elektriksel analizleri, AVANTES marka LED ışıma ölçüm sistemi kullanılarak dalgaboyuna göre parlaklık (irradiance) ölçümleri alınarak elektro-optik analizleri gerçekleştirildi.

4.6.1 Akım-Gerilim (I-V) Ölçümleri ve Analizleri

GS295 ve GS298 Numunelerin Akım-Gerilim (I-V) Ölçümleri: Omik kontakları oluşturulmuş numunelerin Keithley 4200 ölçüm sistemi kullanılarak akım-gerilim (I-V) ölçümleri alındı. Oda sıcaklığında alınan ölçümler sonucu elde edilen I-V grafikleri Şekil 4.81 ve Şekil 4.82'de sunuldu.



Şekil 4.81. Aşındırılmış ve aşındırılmamış GS295 numunelerinin I-V grafikleri



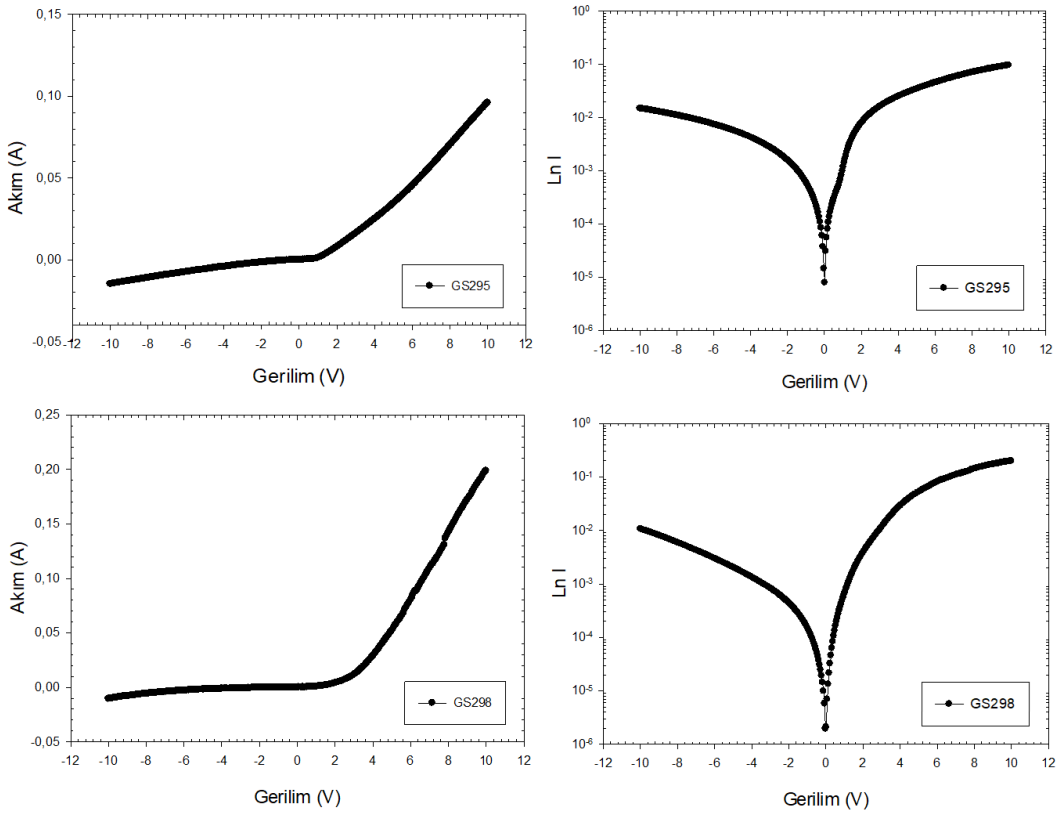
Şekil 4.82. Aşındırılmış ve aşındırılmamış GS298 numunelerinin I-V grafikleri

Bu grafikler incelendiğinde, aşındırılmış ve aşındırılmamış GS295 ve GS298 numunelerinin I-V grafiklerinin diyot karakteristiği gösterdiği anlaşılmaktadır (Odnoblyudov, 2006). Ayrıca ln(I)-V grafiklerinden de görüldüğü gibi, aşındırılmamış numunelerin doğrultma faktörlerinin aşındırılanlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir (Tablo 4.12). Sonuç olarak, aşındırma işlemi yapılmadan kontak oluşturulan numunelerin diyot özelliklerinin daha iyi olduğu görüldü.

Tablo 4.12. Aşındırılmış ve aşındırılmamış GS295 ve GS298 numunelerinin doğrultma faktörleri

Numune	**Doğrultma Faktörü**
GS295 Aşındırılmış	1.42
GS295 Aşındırılmamış	3.77
GS298 Aşındırılmış	2.15
GS298 Aşındırılmamış	27.22

Aşındırma işlemi yapılmadan kontak oluşturulan numunelerin diyot özelliklerinin daha iyi olduğu görüldüğünden Vakum-Buharlaştırma tekniği ile alınacak AuNiGe kontakların, aşındırma işlemi yapılmadan oluşturulmasına karar verildi.



Şekil 4.83. GS295 ve GS298 Numunelerinin I-V Grafikleri

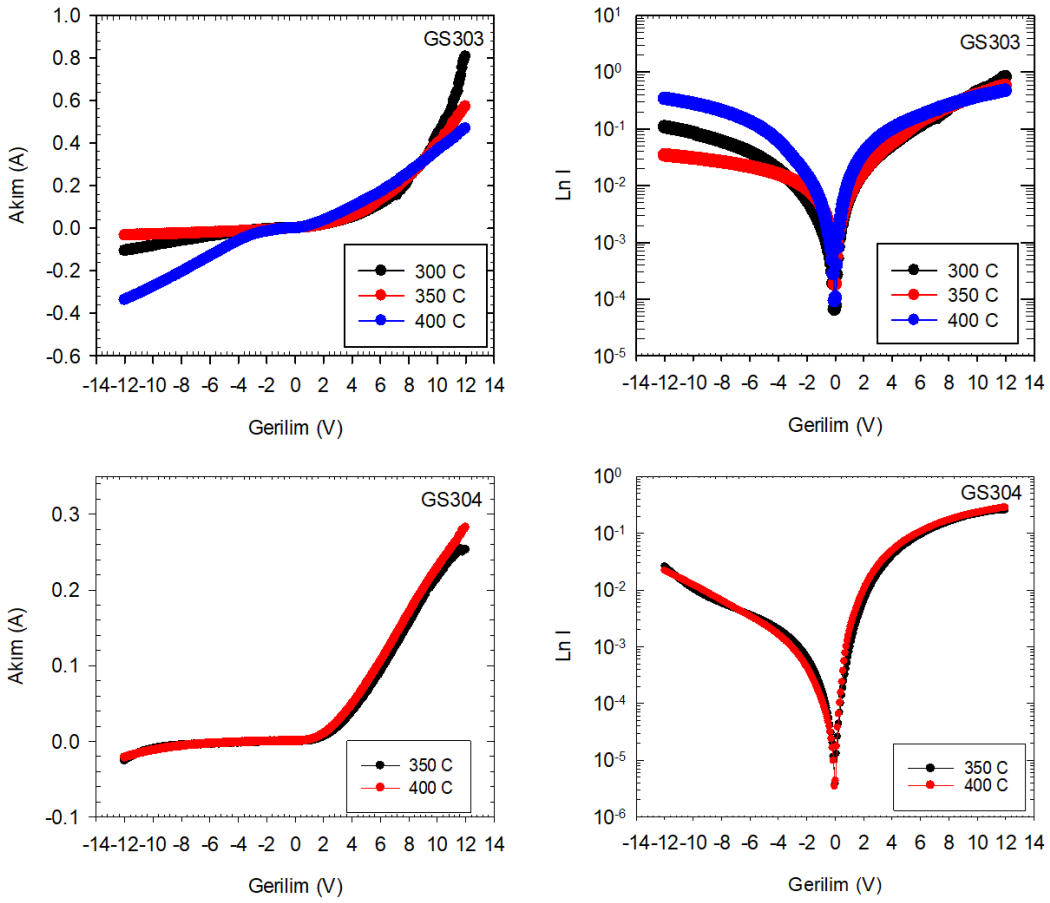
AuNiGe omik kontakları oluşturulmuş numunelerin akım-gerilim ölçümleri, Keitley-4200 Yarıiletken Karakterizasyon Sistemi'nde yapıldı. Oda sıcaklığında alınan ölçümler sonucu elde edilen I-V grafikleri Şekil 4.83'de verildi.

Bu grafikler incelendiğinde, Tablo 4.13'den görüldüğü gibi GS298 numunesinin doğrultma faktörünün ve GS295'e göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu duruma göre, GS298 numunesinin diyot özelliğinin GS295 numunesine göre daha iyi olduğu söylenebilir.

Tablo 4.13. AuNiGe ile kontakları oluşturulmuş GS295 ve GS298 numunelerinin doğrultma faktörleri

Numune	Doğrultma Faktörü
AuNiGe_GS295	6.49
AuNiGe_GS298	18.75

GS303 ve GS304 Numunelerin Akım-Gerilim (I-V) Ölçümleri: Omik kontakları oluşturulmuş numunelerin akım-gerilim ölçümleri, Keitley-4200 Yarıiletken Karakterizasyon Sistemi'nde yapıldı. Oda sıcaklığında alınan ölçümler sonucu elde edilen I-V grafikleri Şekil 4.84'de verildi.



Şekil 4.84. GS303 ve GS304 numunelerinin I-V grafikleri

Şekil 4.84 incelendiğinde, GS303 numunesi için tavlama sıcaklığı 300 °C'den 350 °C'e çıkarıldığında numunenin diyot karakteristiğine daha çok uyduğunu fakat tavlama sıcaklığı 400 °C olduğunda diyot davranışının bozulduğu görülmektedir. GS304 numunesinin ise her iki tavlama sıcaklığında diyot davranışı sergilediği görüldü. Ayrıca ln(I)-V grafiklerinden de görüldüğü gibi, GS303 numunesinin doğrultma faktörü en yüksek 350 °C tavlama sıcaklığında, GS304 numunesinde ise 400 °C tavlama sıcaklığında elde edildi (Tablo 4.14).

Tablo 4.14. GS303 ve GS304 numunelerinin doğrultma faktörleri

Numune	Doğrultma Faktörü
GS303_300 °C	7.58
GS303_350 °C	16.91
GS303_400 °C	1.39
GS304_350 °C	9.85
GS304_400 °C	13.00

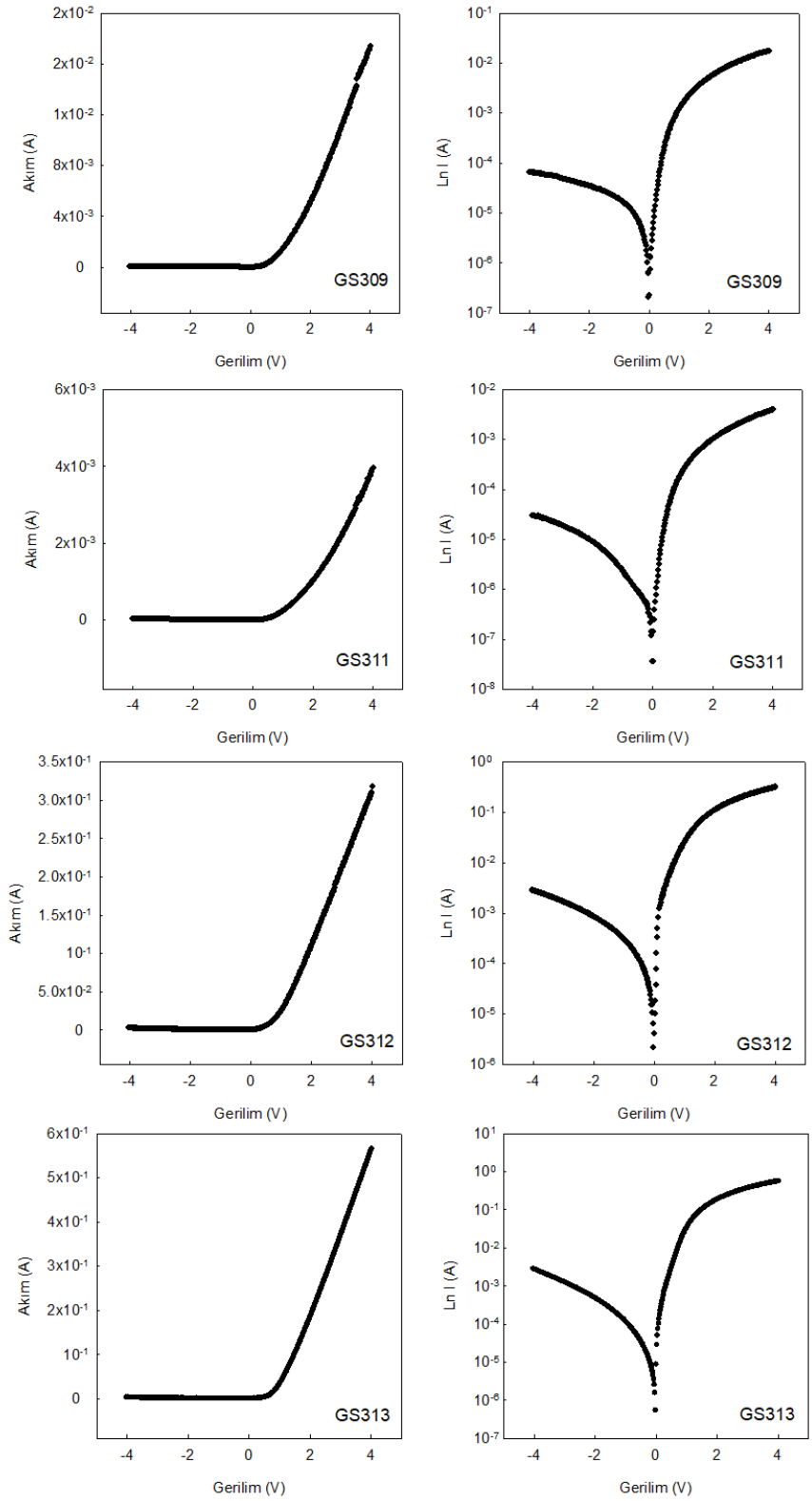
GS309, GS311, GS312 ve GS313 Seyreltik Azotlu Kuantum Kuyulu GaAsPN/GaPN LED Numunelerinin Akım-Gerilim (I-V) Ölçümleri: Omik kontakları oluşturulmuş numunelerin Keithley 4200 ölçüm sistemi kullanılarak akım-gerilim (I-V) ölçümleri alındı. Oda sıcaklığında alınan ölçümler sonucu elde edilen I-V grafikleri Şekil 4.85'de sunuldu.

Numunelerin ln(I)-V grafikleri incelendiğinde, diyot karakteristiğine uydukları görülmektedir (CHAND, 1996). Bu grafiklerden elde edilen veriler ve gerekli formüller kullanılarak, diyotların elektriksel parametreleri [idealite faktörü (η), ters doyum akımı (I_0) ve potansiyel engel yüksekliği (Φ_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, termoiyonik emisyon teorisine göre Eş. 3 ile verilir (Chand, 1996).

$$I = I_0 \exp\left(\frac{q(V-IR_S)}{\eta kT}\right)\left[1-\exp\left(-\frac{q(V-IR_S)}{kT}\right)\right] \qquad [3]$$

Burada V doğru beslem gerilimi, η 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 ile verilir.



Şekil 4.85. GS309, GS311, GS312 ve GS313 numunelerinin I-V ve ln(I)-V Grafikleri

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{B_0}}{kT}\right) \qquad [4]$$

Burada A, cm^2 cinsinden diyot alanı, A^* ise Richardson sabitidir (Si için Richardson sabiti 112 $A.cm^{-2}.K^{-2}$, GaP için ise 98.2 $A.cm^{-2}.K^{-2}$ 'dir) (Tataroğlu, 2013; Orak, 2015). Φ_{Bo}, eV cinsinden sıfır beslem engel yüksekliğidir ve Eş.4 ile hesaplanır. Eş. 3 ve Eş. 4 kullanılarak diyot için idealite faktörü (η) Eş. 5 ile hesaplanır.

$$\eta = \frac{q}{kT}\left(\frac{dV}{d\ln(I)}\right) \qquad [5]$$

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

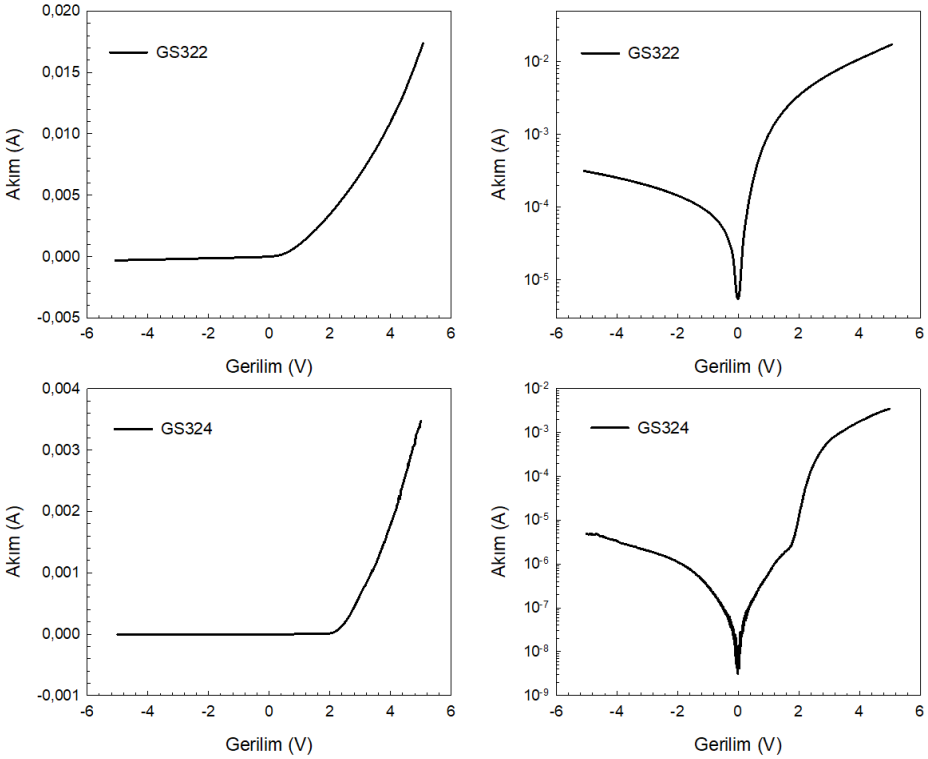
Numunelerin diyot aygıt parametreleri, Eş. 4 ve Eş. 5 kullanılarak hesaplandı ve Tablo 4.15'de verildi. Ayrıca numunelerin doğrultma faktörleri de bu tabloda sunuldu.

Tablo 4.15. Hesaplanan elektriksel parametreler ve doğrultma faktörleri

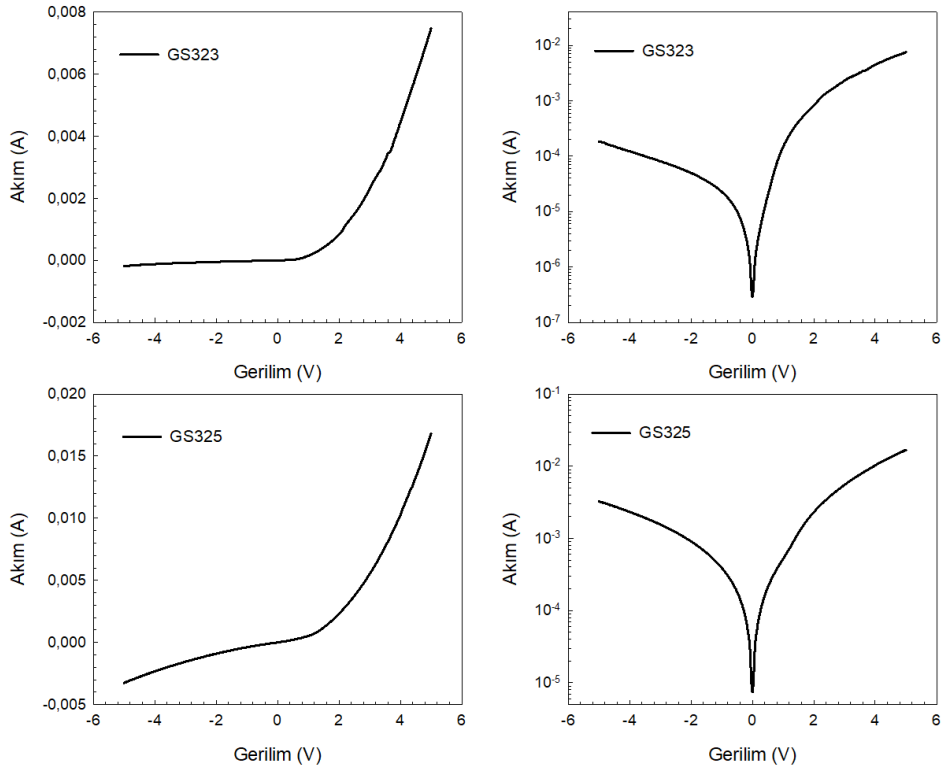
	η	**I_0**	**Φ_b**	**Doğrultma Faktörü**
GS309	2.86	8.22E-07	0.69	264.90
GS311	2.80	1.75E-07	0.73	167.80
GS312	4.95	2.81E-04	0.52	96.04
GS313	2.86	3.01E-05	0.58	131.74

Numunelerin ln(I)-V grafikleri ve doğrultma faktörleri incelendiğinde önceki dönem içinde elde edilen değerlere göre çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Tablo 4.15 incelendiğinde GS311 numunesinin; daha iyi elektriksel parametrelere (daha düşük doyum akımına, daha düşük idealite faktörüne ve daha yüksek potansiyel engel yüksekliğine) sahip olduğu görülmektedir. Numunelerin idealite faktörlerinin, literatürde yer alan diyot fabrikasyonu yapılmış seyreltik azotlu p-n eklem yapılar ile kıyaslandığında, uyumlu olduğu görülmektedir (Hatakenaka, 2008).

GS322, GS323, GS324 ve GS325 Seyreltik Azotlu İki-Renkli GaAsPN LED Numunelerinin Akım-Gerilim (I-V) Ölçümleri: Omik kontakları oluşturulmuş numunelerin akım-gerilim ölçümleri, Keitley-4200 Yarıiletken Karakterizasyon Sistemi'nde yapıldı. Oda sıcaklığında alınan ölçümler sonucu elde edilen I-V grafikleri Şekil 4.86 ve Şekil 4.87'de verildi.



Şekil 4.86. GS322 ve GS324 numunelerinin I-V ve ln(I)-V Grafikleri



Şekil 4.87. GS323 ve GS325 numunelerinin I-V ve ln(I)-V Grafikleri

Farklı alaşım oranlarına sahip seri/paralel bağlı iki p-n eklem yapısı içeren GS324 ve GS325 numunesinin ln(I)-V grafiğinde bu iki ekleme ait bükülmeler açıkça görülmektedir. Benzer yapıda fakat Si alttaş üzerine büyütülen GS322 ve GS2323 numunelerinde ise ikinci ekleme ait bükülme ln(I)-V grafiğinden gözlenemedi.

Numunelerin ln(I)-V grafikleri incelendiğinde, diyot karakteristiğine uydukları görülmektedir (CHAND, 1996). Bu grafiklerden elde edilen veriler, Eş. 4 ve Eş. 5 kullanılarak diyotların elektriksel parametreleri [idealite faktörü (η), ters doyum akımı (I_0) ve potansiyel engel yüksekliği (Φ_B)] belirlendi ve Tablo 4.16'da verildi.

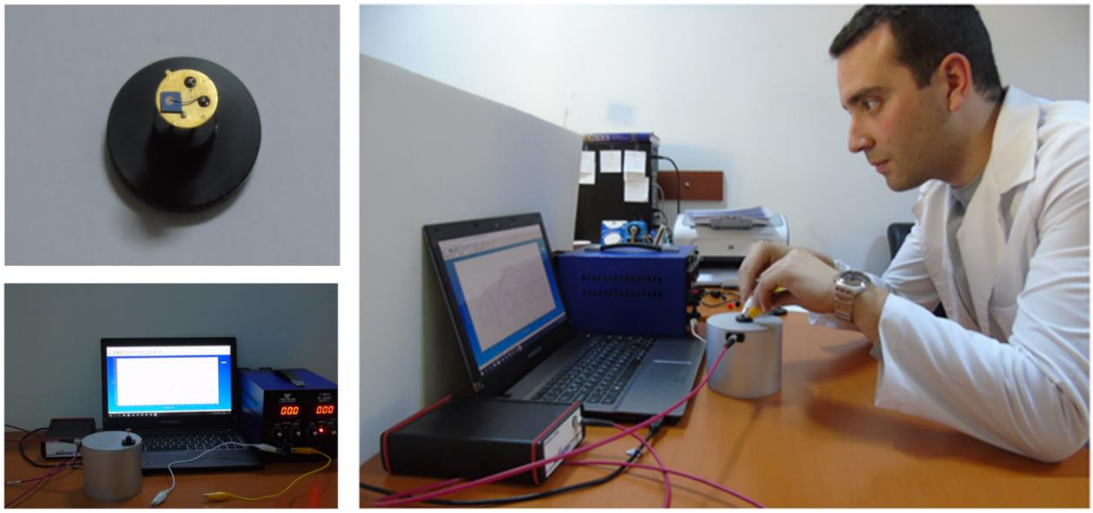
Eklemler farklı alaşım oranına sahip olduğu için birbirinden farklı potansiyel engel yüksekliğine (Φ_B) sahiptir. Yüksek Φ_B değerinin, yasak enerji aralığı daha yüksek olan ekleme ait olduğu düşünülmektedir. Si alttaş üzerine büyütülen GS322 ve GS323 numunelerinde ikinci ekleme ait bükülme net olarak görülemediği için ilgili hesaplamalar yapılamamıştır. Diyotların idealite faktörleri birbirine ve daha önce fabrikasyonu yapılan diyotlara uyumludur.

Tablo 4.16. Diyotların hesaplanan elektriksel parametreleri

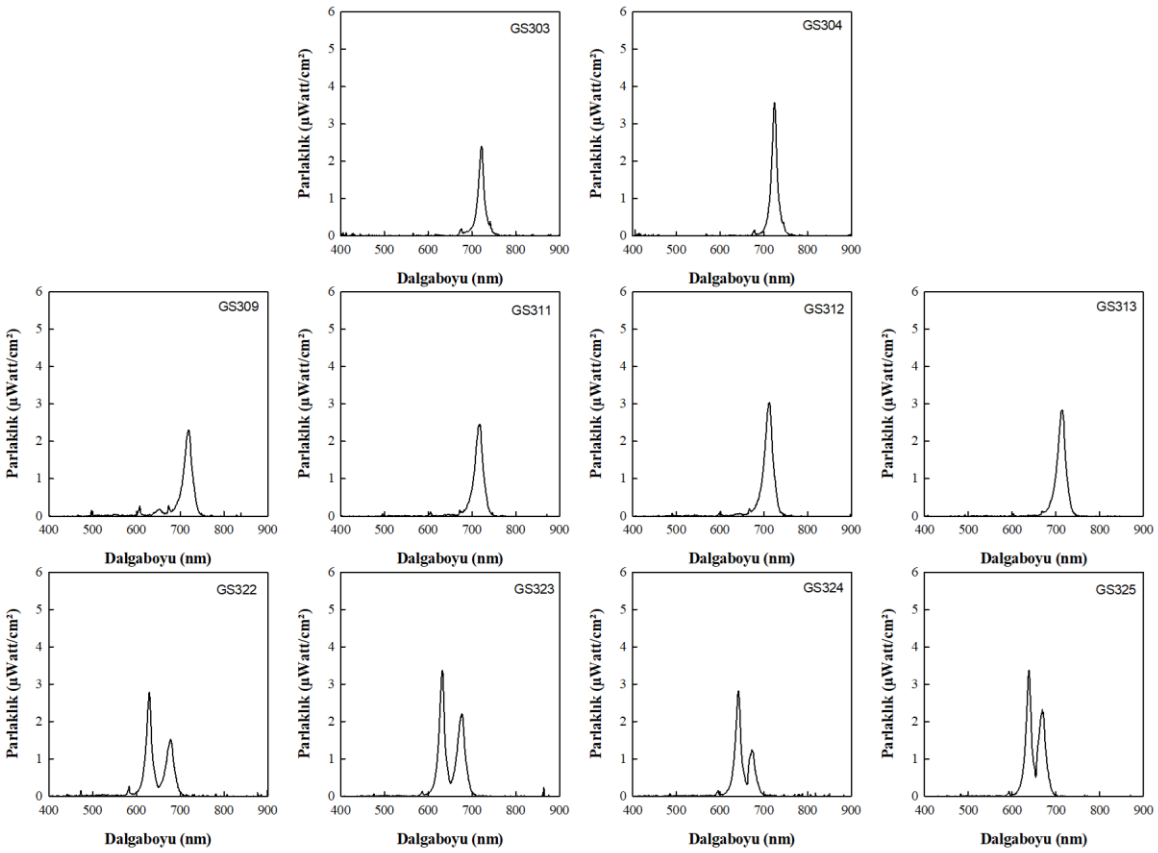
Numune	LED	η	I_0	Φ_b
GS322	1.LED	7.62	1.89E-05	0.61
	2.LED	-	-	-
GS323	1.LED	7.15	1.14E-06	0.68
	2.LED	-	-	-
GS324	1.LED	5.92	1.26E-08	0.79
	2.LED	5.35	6.21E-12	0.99
GS325	1.LED	9.36	3.26E-05	0.59
	2.LED	24.86	1.15E-04	0.56

4.6.2 Parlaklık-Dalgaboyu Ölçümleri ve Analizleri

LED karakterizasyon sisteminde ölçüm almak üzere hazırlanmış LED aygıtlardan birinin ve ölçüm sisteminin görüntüleri Şekil 4.88'de verildi.



Şekil 4.88. LED aygıtlardan birinin ve ölçüm sisteminin görüntüleri



Şekil 4.89. Numunelerin parlaklığının dalgaboyuna göre değişimi

LED ışıma analizlerinin düzgün olarak yapılabilmesi için aygıt paketlemesi önemlidir. Geliştirdiğimiz aygıtlar paketlenmemiş olmakla birlikte ışıma değerleri ölçülmeye çalışıldı: Hazırlanan aygıt karakterizasyon küresi içerisine yerleştirilerek ışıma değerleri analiz edildi.

Sistemde yapılan ölçümler sonucunda numuneler için parlaklığının dalgaboyuna göre değişimi Şekil 4.89'da sunuldu.

Yapılan bu analiz sonucunda; tek-renkli GS303 ve GS304 LED aygıtlarının ışıma dalgaboylarının 721 ve 724 nm, kuantum kuyulu GS309, GS311, GS312 ve GS313 LED aygıtlarının ışıma dalgaboylarının sırasıyla 719, 716, 712 ve 714 nm civarında olduğu belirlendi. İki-renkli GS322, GS323, GS324 ve GS325 LED aygıtları için ışıma dalgaboyları sırasıyla (629 ve 679), (632 ve 677), (641 ve 673) ve (639 ve 669) nm olarak belirlendi. Ayrıca, LED aygıtların parlaklık/ışıma gücünün 2 ile 4 $\mu W/cm^2$ civarında olduğu görüldü. Bununla birlikte, geliştirilen LED yapılarının fotometrik parametrelerinin değerlendirilebileceği yeterlilikte veri elde edilememiştir.

5. SONUÇLAR

“Seyreltik Azotlu Yapıların Epitaksiyel Büyütme Mekanizmaları ve LED Aygıt Fabrikasyonu” başlıklı bu proje çalışmasında, seyreltik azotlu III-V grubu GaAsPN tek-renkli, kuantum kuyulu ve iki-renkli ışık yayan diyot (LED) yapıları Moleküler Demet Epitaksi (MBE) tekniği ile Si ve GaP alttaşlar üzerine büyütüldü. Bilgimiz dahilinde, MBE tekniği ile ülkemizde ilk olarak büyütülen seyreltik azotlu LED yapılarının yapısal, optik ve elektriksel özellikleri HRXRD, Hall etkisi, SIMS, AFM, FTIR, PL, SE, I-V ve Işınım Ölçme sistemleri ile karakterize edildi. Yapıların kristal kalitesi, alaşım oranları, kusur yoğunlukları, enerji bant aralıkları, derinlik profilleri, yüzey morfolojisi, taşıyıcı yoğunlukları ve taşıyıcı hareketlilikleri incelendi.

Si alttaş üzerine GaP epi-katmanının MBE tekniği ile düzgün olarak büyütülmesi başarıldı ve karakterize edildi. Si alttaş üzerine GaP katmanının düzgün olarak büyütülmesi şu şekilde başarıldı: (110) düzlemine 4°’lik açıyla kesilmiş (100) yönelimli Si alttaş üzerine MEE (migration enhanced epitaxy) tekniği ile 5x(Ga/P_2) tabakası büyütüldü ve bu yöntem ile oluşturulan tabakanın üzerine katkısız GaP katmanı 400 °C'de büyütüldü. Daha sonra, P_2 akısı altında dakikada 1.6 °C adım-artımlı olarak 400 °C'den 480 °C'e kadar alttaş sıcaklığı arttırılarak alttaşın 480 °C'de 40 dakika tavlanması ile Si alttaş üzerine GaP büyütmesi tamamlandı. Bu yöntem yayınlanan proje kapsamındaki makale ile literatüre kazandırılmıştır ve son yıllarda üzerinde çalışmalar yapılmakta olan III-V grubu bileşimlerin Si alttaş üzerine büyütülmesi çalışmalarına katkılar sağlaması beklenmektedir. LED ve fotovoltaik hücre geliştirme çalışmalarına destek olabilecek bu başarının projemizin önemli bir çıktısı olduğu düşünülmektedir.

Kalibrasyon numunelerinden elde edilen verilerden yararlanılarak büyütülen seyreltik azotlu tek-renkli, kuantum kuyulu ve iki-renkli ışık yayan diyot (LED) yapıları büyütülerek karakterize edildi ve bu yapılara litografik işlemler uygulanarak LED fabrikasyonları gerçekleştirildi.

Yapıların elektriksel ölçümlerde diyot karakteristiği gösterdikleri belirlendi. İki renkli ışıma yapması amacıyla oluşturulan aygıtların iki farklı dalgaboyunda (613-675 nm aralığında) ışıma verdiği tespit edildi. Bununla birlikte, ışınım ölçümleri alınan yapıların ışıma güçlerinin çok düşük olduğu belirlendi. Bu durumun yapılardaki kristal kusurlarını ve metalizasyon kaynaklı seri direncin yüksek değerde olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Diğer taraftan, hem Si hem de GaP alttaşlar üzerine büyütülerek fabrikasyonları yapılan iki-renkli

LED'lerin iki farklı dalga boyunda ışımasının elde edilmesi başarılmıştır. Bu yapıların ve fabrikasyon süreçlerinin iyileştirilmesi gerekmektedir.

Desteklenen bu proje ile seyreltik azotlu III-V grubu yarıiletkenlerden tek-renkli, kuantum kuyulu ve iki-renkli LED yapılarının üretimi ve karakterizasyonları; diyot fabrikasyonu ve analizleri alanında bilgi birikimi oluşturulmuş ve bu teknolojinin geliştirilebilmesinde iyi bir deneyim kazanılmıştır.

Proje süresi içerisinde proje kapsamında elde edilen verilerden üretilen çalışmalar:

- Tezler:
  - Tunç Sertel, "Seyreltik Azotlu p-n Eklem Yapılarının MBE Tekniği ile Büyütülmesi ve Karakterizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016.
- "Science Citation Index" de Yayınlanan Makaleler:
  - T. Sertel, Y. Ozen, S.S. Cetin, M.K. Ozturk, S. Ozcelik, "Structural, optical and electrical characterization of dilute nitride GaP1-x-yAsyNx structures grown on Si and GaP substrates", Journal of Materials Science: Materials in Electronics, DOI: 10.1007/s10854-017-8104-y
  - T. Sertel, Y. Ozen, A. Tataroglu, T. Asar, S.S. Cetin, S. Ozcelik, "Electrical Properties of Dilute Nitride GaAsPN/GaPN MQW p-i-n Diode", Journal of Electronic Materials, 46(7), 4590-4595 (2017). DOI: 10.1007/s11664-017-5460-6
- Uluslararası Kongre Bildirileri:
  - T. Sertel, S.Ş. Çetin, S. Özçelik, "The Studies on Epitaxial Growth of Dilute Nitride III-V Semiconductors by MBE Technique", Turkish Physical Society 33th International Physics Congress, 06-10 September 2017, Bodrum, Turkey. (Sözlü Bildiri)
  - T. Sertel, Y. Özen, A. Tataroğlu, T. Asar, S.Ş. Çetin, S. Özçelik, "Electrical Properties of Dilute Nitride GaAsPN/GaPN MQW p-i-n Diode", Turkish Physical Society 33th International Physics Congress, 06-10 September 2017, Bodrum, Turkey. (Poster Bildiri)
- Ulusal Kongre Bildirileri:
  - Tunç Sertel, Yunus Özen, Gürkan Kurtuluş, Tarık Asar, M. Kemal Öztürk, S. Şebnem Çetin, Süleyman Özçelik, "Seyreltik Azotlu GaAsPN/GaPN Kuantum Kuyu Yapısının MBE Tekniği ile Büyütülmesi, Yapısal ve Elektriksel Karakterizasyonu", 22. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, 16 Aralık 2016, Ankara, Türkiye. (Poster Bildiri)

- Tunç Sertel, Yunus Özen, Tarık Asar, Saime Şebnem Çetin, Süleyman Özçelik, “Seyreltik Azotlu $GaP_{1-x-y}As_yN_x$ p-n Eklem Yapılarının MBE Tekniği ile Büyütülmesi, Yapısal, Optik ve Elektriksel Karakterizasyonu”, FOTONİK 2016, 18. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı, 23 Eylül 2016, Ankara, Türkiye. (Poster Bildiri)

- Saime Şebnem Çetin, Tunç Sertel, Tarık Asar, Süleyman Özçelik “GaP/Si Yapılarının MBE Tekniği ile Büyütülmesi ve Karakterizasyonları”, Adım Fizik Günleri V, 21-23 Nisan 2016, Eskişehir, Türkiye. (Poster Bildiri)

- Tunç Sertel, Gürkan Kurtuluş, Emine Boyalı, Tarık Asar, Mustafa Kemal Öztürk, Saime Şebnem Çetin, Süleyman Özçelik, “Seyreltik Azotlu $GaP_{1-x}N_x$ ve $GaP_{1-x-y}As_yN_x$ Yarıiletken Yapılarının MBE Tekniği ile Büyütülmesi ve Karakterizasyonu”, 21. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, 25 Aralık 2015, Ankara, Türkiye. (Poster Bildiri)

Proje kapsamında yapılan çalışmalardan yayınlanmak üzere makale yazım çalışmaları devam edecektir.

TÜBİTAK tarafından desteklenmiş olan 114F224 numaralı bu proje çalışması ile ulaşılan deneyim ve oluşan bilgi birikimi yanında seyreltik azotlu tek-renkli, kuantum kuyulu ve iki-renkli LED üretimi ve aygıt fabrikasyonu alanında deneyimli bir ar-ge grubu oluşmuştur. Bu projede elde edilen bilgi ve deneyimin daha verimli LED yapıların büyütülmesine ve aygıtların üretilmesine temel teşkil edebileceği düşünülmektedir ve yeni projelerin gelişimine katkı sağlayabilecektir.

KAYNAKLAR

Bauer, G., Richter W. 1996, “Optical Characterization of Epitaxial Semiconductor Layers”, Springer-Verlag, New York, 6-128, 287-390.

Bhat, R., Caneau, C., Salamanca-Riba, L., Bi, W., 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), 427-37.

Boylestad R., Nashelsky, L. 1998. Electronic Devices and Circuit Theory (Seventh Edition). New York/USA: Prentice-Holl, 3-42.

Chand, S., Kumar J. 1996. “Evidence for the double distribution of barrier heights in Pd_2Si/n-Si Schottky diodes from I-V-T measurements”, Semiconductor Science and Technology, 11(8), 1203-8.

Clawson, A.R. 2001. “Guide to references on III-V semiconductor chemical etching”, Materials Science and Engineering, 31, 1-438.

Cornet, C., Robert, C., Thanh, T.N., Guo, W., Bondi, A., Elias, G., Letoublon, A., Richard, S., Burin, J.-P., Perrin, M., Jancu, J.-M., Durand, O., Even, J., Loualiche, S., Folliot, H., Bertru, N., Ponchet, A., Corre, A.L. 2011. “Carrier Injection in GaAsPN/GaPN Quantum Wells on Silicon”, International Conference on Indium Phosphide and Related Materials-IPRM 2011, Berlin, Germany.

Dagnelund, D., Stehr J., Egorov AYu, Chen W.M., Buyanova I.A., 2013. Appl. Phys. Lett. 102, 021910.

Egorov, A.Y., Kryzhanovskaya, N.V., Sobolev, M. S. 2011. “Optical properties of quantum-confined heterostructures based on $GaP_xN_yAs_{1-x-y}$ alloys”, Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov, 45(9), 1209-13.

Erol, A., “Dilute III-V Nitride Semiconductors and Material Systems, Physics and Technology”, Berlin/Germany: Springer-Verlag, V-IX, 1-330, (2008).

Fujiwara, H. 2007. Spectroscopic Ellipsometry Principles and Applications. John Wiley&Sons, New York, 1-3, 259-60.

Furukawa, Y., Yonezu, H., Ojima, K., Samonji, K., Fujimoto, Y., Momose, K., 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.

Gfroerer, T.H. 2000. Photoluminescence in Analysis of Surfaces and Interfaces. Encyclopedia of Analytical Chemistry R.A. Meyers (Ed.), John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 9209-31.

Grassman, T.J. 2009. “Toward Metamorphic Multijunction GaAsP/Si Photovoltaics Grown on Optimized GaP/Si Virtual Substrates Using Anion-Graded GaAsyP1-y Buffers”, Doi: 978-1-4244-2950-9/09, 002016-21.

Grassman, T.J., 2010. “Characterization of Metamorphic GaAsP/Si Materials and Devices for Photovoltaic Applications”, IEEE Transactions on Electron Devices, 57(10), 3361-8.

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), 2707–29.

Hatakenaka, S., Nakanishi Y., Wakahara A., Furukawa Y., Okada H. 2008. "Doping control and evaluation of pn-junction LED in GaPN grown by MOVPE, Journal of Crystal Growth, 310(23), 5147-50.

Henini, M. 2005. Dilute Nitride Semiconductors (First Edition). Oxford/UK: Elsevier, 1-468.

Herman, M.A.,Sitter, H. 1996. Molecular Beam Epitaxy: Fundamentals and Current Status (Second Edition), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1-453.

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, 511-6.

Kim, K.J., Lee M.H., Bahng J.H., Shim K., Choe B.D. 1998. "Optical constants and electronic interband transitions of disordered GaAs1-xPx alloy", Journal of Applied Physics, 84(7), 3696-9.

Kinaci, B., "InxGa1-XAs/GaAs Çoklu Kuantum Kuyu Yapısının MBE Tekniği ile Büyütülmesi: Yapısal, Optik ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi", (Yüksek Lisans Tezi), Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2009).

Levinshtein, M., Rumyantsev, S., 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, 104-19.

Malikova, l., Pollak, F. H., Bhat, R. 1998. "Composition and temperature dependence of the direct band gap of GaAs1-xNx (0≤x≤0,0232) using contactless electroreflectance", Journal of Electronic Materials, 27(5), 484-7.

Mascarenhas, A., Zhang Y. 2001. "Dilute nitride based III–V alloys for laser and solar cell applications", Current Opinion in Solid State and Materials Science, 5, 253-9.

Misaelides, P. 1995. Application of partical and laser beams in materials technology p.625.5.

Nalini, R.P., Dufour, C., Cardin, J., Gourbilleau, F. 2011. "New Si-based multilayers for solar cell applications", Nanoscale Research Letters, 6, 156.

Odnoblyudov, V.A., Tu C.W. 2006. "Amber GaNP-based light-emitting diodes directly grown on GaP(100) substrates", J. Vac. Sci. Technol. B, 24(5), 2202-4.

Odnoblyudov, V.A., Tu C.W. 2006 "Growth and fabrication of InGaNP-based yellow-red light emitting diodes", Applied Physics Letters, 89, 191107.

Orak, I., Ejderha K., Turut A. 2015. "The electrical characterizations and illumination response of Co/N-type GaP junction device", Current Applied Physics, 15, 1054-1061.

Parker, E.H.C., 1985. The technology and physics of molecular beam epitaxy, Plenum Press, New York, 1-679.

Peternai, l., Jakabovič J., Michalka M. 2003. "Ohmic contacts to n- and p-type GaP", APCOM 2003, 9th International Workshop on Applied Physics of Condensed Matter, June 11-13.

Robert, C., Bondi A., Thanh T.N., Even J., Cornet C., Durand O., Burin J.P., Jancu J.M., Guo W., Létoublon A., Folliot H., Boyer-Richard S., Perrin M., Chevalier N., Dehaese O., Tavernier K., Loualiche S., Corre A.L. 2011. "Room temperature operation of GaAsP(N)/GaP(N) quantum well based light-emitting diodes: Effect of the incorporation of nitrogen", Appl. Phys. Lett., 98, 251110.

Sanz-Hervas, A., Garrido M., Aguilar M., Sacedon A., Sfinchez-Rojas J.L., Calleja E., Mufioz E., Villar C., Abril E.J., Lopez M. 1997. "Application of high resolution X-ray diffractometry to the structural study of epitaxial multilayers on novel index surfaces", Microelectronics Journal, 28(8-10), 777-84.

Sato, T., Imai M. 2002 "Effects of nitrogen on GaAsP light-emitting diodes" J. Appl. Phys., 91(10), 6266-72.

Shan, W., Yu, K.M., Walukiewicz, W., Wu, J., Ager, J.W., Haller, E.E. 2004. "Band Anticrossing in dilute nitrides" Journal of Physics: Condensed Matter, 16, 3355-72.

Singh, J. 2003. Electronic and optoelectronic properties of semiconductor structures, Cambridge University Press, New York, 1-494.

Streetman, B.G., Banerjee, S. K. 2006. Solid State Electronic Devices (Sixth Edition). New Jersey/USA: Prentice-Hall, 1-94, 154-67.

Suryanarayana, C., Norton, M.G. 1998. "X-ray diffraction a practical approach", Plenum Press, New York, 98, 125.

Sze, S.M. 2002. Semiconductor Devices, Physics and Technology, John Wiley&Sons, USA, 85-127, 288-94.

Sze, S.M., K. Ng, K. 2006. Physics of Semiconductor Devices (Third Edition). New Jersey/USA: John Wiley & Sons, 79-129.

Takaqi, S. 1962. "Dynamical theory of diffraction applicable to crystals with any kind of small distortion". Acta Crystallographica, 15(12), 1311-2.

Tataroğlu, A., Pür F.Z. 2013. "The Richardson constant and barrier inhomogeneity at Au/Si3N4/n-Si (MIS) Schottky diodes, Physica Scripta, 88(1), 1-5.

Thanh, T. N., Robert C., Guo W., Létoublon A., Cornet C., Elias G., Ponchet A., Rohel T., Bertru N., Balocchi A., Durand O., Micha J. S., Perrin M., Loualiche S., Marie X., Corre A. L. 2012. "Structural and optical analyses of GaP/Si and (GaAsPN/GaPN)/GaP/Si nanolayers for integrated photonics on silicon", J. Appl. Phys. 112, 053521.

Thanh, T.N., Robert C., Giudicelli E., Le´toublon A., Cornet C., Ponchet A., Rohel T., Balocchi A., Micha J.S., Perrin M., Loualiche S., Marie X., Bertru N., Durand O., Corre A. L, 2013. "Quantitative study of microtwinsin GaP/Si thin film and GaAsPN quantum wells grown on silicon substrates", Journal of Crystal Growth, 378, 25–8.

Thompson, F., Newman, R.C. 1971. "Localized vibrational modes of light impurities in gallium phosphide Absorption spectra", Journal of Physics C: Solid State Physics, 4 (18), 3249-57.

Uesugi, K., Marooka, N., 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), 1254-6.

Umeno, K., Furukawa, Y., Wakahara, A., Noma, R., Okada, H., Yonezu, H., Takagi, Y., Kan, H. 2009. “MBE growth of GaAsN/GaP(N)quantum wells with abrupt heterointerfaces for photonics applicationson Si substrates”, Journal of Crystal Growth 311, 1748.

Ünsal, Ö.L., Gönül, B., Temiz, M. 2014. “A theoretical investigation of the band alignment of type-I direct band gap dilute nitride phosphide alloy of GaNxAsyP1-x-y/GaP quantum well on GaP substrates”, Chinese Physics B, 23(7), 1-5.

Varriano, J.A., Koch M.W., Johnson G.G., Wicks G.W. 1992. “GaInP and AlInP grown by elemental source molecular beam epitaxy”, Journal of Electronic Materials, 21, 195-8.

Vurgaftman, I., Meyer, J.R. 2001. “Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys” Applied Physics Reviews, 89(11), 5815-75.

Vurgaftman, I., Meyer, J.R. 2003. “Band parameters for nitrogen-containing semiconductors” Journal of Applied Physics, 94(6), 3675-96.

Wang, J. 2011. “Numerical analysis of bandgap & bowing parameter in InxGa1-xN alloy with virtual crystal approximation (VCA) & dielectric model (DM)” University of Notre Dame Departman of Electrical Engineering, Indiana/USA..

Wu, J., Walukiewicz, W., Haller, E.E. 2002. “Band structure of highly mismatched alloys: Coherent potential approximation” Physical Review B., 65(23), 1-4.

Yu, X., Kuo P.S., Ma K., Levi O., Fejer M.M. 2004. “Single-phase growth studies of GaP on Si by solid-source molecular beam epitaxy”, J. Vac. Sci. Technol. B, 22, 1450-4.

Zhao, C. Z., Wei, T., Sun, X. D., Wang, S. S., 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.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Doç. Dr. SAİME ŞEBNEM ÇETİN
Proje No:	114F224
Proje Başlığı:	Seyreltik Azotlu Yapıların Epitaksiyel Büyütme Mekanizmaları Ve Led Aygıt Fabrikasyonu
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	36
Araştırmacılar:	MUSTAFAKEMAL ÖZTÜRK, ADEM TATAROĞLU
Danışmanlar:	SÜLEYMAN ÖZÇELİK
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	GAZİ Ü. FEN F. FİZİK B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/10/2014 - 01/10/2017
Onaylanan Bütçe:	476570.0
Harcanan Bütçe:	324567.22
Öz:	Proje kapsamında, seyreltik azotlu III-V grubu GaAsPN tek-renkli, kuantum kuyulu ve iki-renkli ışık yayan diyot (LED) yapıları Moleküler Demet Epitaksi (MBE) tekniği ile Si ve GaP alttaşlar üzerine büyütüldü. Si alttaş üzerine GaP katmanının düzgün olarak büyütülmesi (110) düzlemine 4??lik açıyla kesilmiş (100) yönelimli Si alttaş kullanımı, MEE (migration enhanced epitaxy) tekniği ve P2 akısı altında belli zaman aralıklarında alttaş sıcaklığının adım-artımlı olarak değişimi yöntemi kullanılarak başarıldı. Büyütülen yapıların, yapısal, elektriksel ve optik özellikleri Yüksek Çözünürlüklü X-ışını Kırınımı (HRXRD), Hall Etkisi, İkincil İyon Kütle Spektrometresi (SIMS), Atomik Kuvvet Mikroskopu (AFM), Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Spektrometre, Fotolüminesans (PL) ve Spektroskopik Elipsometre (SE) Sistemleri kullanılarak belirlendi. Bu yapılardan fotolitografik yöntemle LED aygıtı fabrikasyonları Maske Hizalama Sistemi, Vakum-Buharlaştırma (Evaporasyon) Sistemi, Püskürtme (Sputtering), Hızlı Isıl Tavlama Sistemi (RTA) ve Profilometre Sistemleri kullanılarak gerçekleştirildi. Üretilen LED aygıtlarının akım-gerilim (I-V) ölçümleri ile çıktı parametreleri değerlendirildi. LED karakterizasyon sistemi kullanılarak, üretilen LED?lerin parlaklığı ölçüldü. GaP ve Si alttaşlar üzerine Seyreltik azotlu III-V grubu kristal epitaksiyel büyütme süreçlerinin geliştirilmesi, bu yapıların karakterizasyonları, kuantum kuyulu, tek ve iki-renkli LED yapılarının fabrikasyon süreçlerinin geliştirilmesi ar-ge çalışmaları sonucu üretilen LED aygıt prototipleri bu projenin önemli çıktılarını oluşturmaktadır. Proje kapsamındaki LED malzemeleri tamamıyla ülkemizde yerel imkânlarla üretildi ve geliştirilen prototipler elektro-optik aygıt teknolojisi alanında malzeme ve aygıt geliştirme süreçlerinde lisansüstü öğrenciler yetiştirilmesinde katkı sağlamıştır.
Anahtar Kelimeler:	Seyreltik Azot, GaAsPN, GaPN, GaP, Si, LED, MBE
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

TÜBİTAK

Projeden Yapılan Yayınlar:	1- Electrical Properties of Dilute Nitride GaAsPN/GaPN MQW p?i?n Diode (Makale - Diğer Hakemli Makale), 2- Seyreltik Azotlu GaP1-x-yAsyNx p-n Eklem Yapılarının MBE Tekniği ile Büyütülmesi, Yapısal, Optik ve Elektriksel Karakterizasyonu (Bildiri - Ulusal Bildiri - Poster Sunum), 3- GaP/Si Yapılarının MBE Tekniği İle Büyütülmesi Ve Karakterizasyonları (Bildiri - Ulusal Bildiri - Poster Sunum), 4- Seyreltik Azotlu GaP1-x-yAsyNx p-n Eklem Yapılarının MBE Tekniği ile Büyütülmesi, Yapısal, Optik ve Elektriksel Karakterizasyonu (Bildiri - Ulusal Bildiri - Poster Sunum), 5- GaP/Si Yapılarının MBE Tekniği İle Büyütülmesi Ve Karakterizasyonları (Bildiri - Ulusal Bildiri - Poster Sunum), 6- Seyreltik Azotlu GaP1-xNx ve GaP1-x-yAsyNx Yarıiletken Yapılarının MBE Tekniği ile Büyütülmesi ve Karakterizasyonu (Bildiri - Ulusal Bildiri - Poster Sunum), 7- Electrical Properties of Dilute Nitride GaAsPN/GaPN MQW p-i-n Diode (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Poster Sunum), 8- The Studies on Epitaxial Growth of Dilute Nitride III-V Semiconductors by MBE Technique (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 9- Seyreltik Azotlu p-n Eklem Yapılarının MBE Tekniği ile Büyütülmesi ve Karakterizasyonu (Tez (Araştırmacı Yetiştirilmesi) - Yüksek Lisans Tezi),

TÜBİTAK