

**GaN İNCE FİMLERİN ESR SPEKTROSKOPİSİ İLE
İNCELENMESİ**

**INVESTIGATION OF THE GaN THIN FILMS BY ESR
SPECTROSCOPY**

KÜBRA ELİF ASAN

Prof. Dr. ŞEYDA ÇOLAK

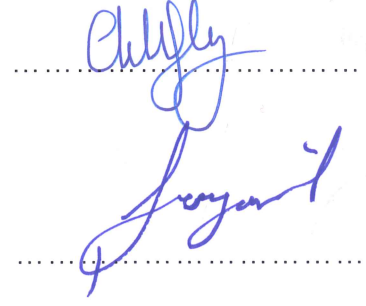
Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Nanoteknoloji Nanotıp Anabilim Dalı için Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2018

KÜBRA ELİF ASAN'nın hazırladığı "**GaN İNCE FİLMLERİN ESR SPEKTROSKOPİSİ İLE İNCELENMESİ**" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **NANOTEKNOLOJİ NANOTİP ANABİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

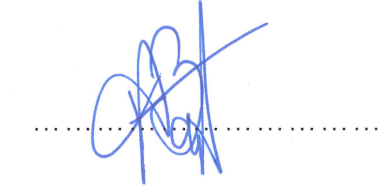
Prof. Dr. Ekmel ÖZBAY
Başkan



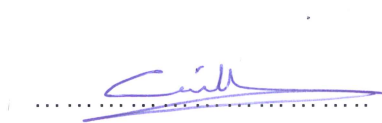
Prof. Dr. Şeyda ÇOLAK
Danışman



Prof. Dr. Mustafa POLAT
Üye



Doç. Dr. Akın BACIOĞLU
Üye



Dr. Öğr. Üy. Cengiz UZUN
Üye

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

- Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.**

(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etmeniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)

- Tezimin/Raporumun 06.06.2018 tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.**

(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı ve ya tamamının fotokopisi alınabilir)

- Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.**

- Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi**

27/06/2018



Kübra Elif ASAN

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitenin başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

06/ 06/ 2018

KÜBRA ELİF ASAN

ÖZET

GaN İNCE FİLMLEİN ESR SPEKTROSKOPİSİ İLE İNCELENMESİ

Kübra Elif ASAN

Yüksek Lisans, Nanoteknoloji ve Nanotıp Anabilimdalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şeyda ÇOLAK

06 Haziran 2018, 57 Sayfa

Bu tez çalışmasında; günümüzde özellikle elektronik sektöründe yaygın olarak kullanılan Galyum Nitrür (GaN) örneğinin karakterizasyonunun yapılması amaçlanmıştır. GaN epitaksiyel yapıları, farklı üretim koşullarının sonucu olarak farklı seviyelerde karbon katkılanarak üretilmektedir ve örneklerin içerdikleri karbon oranı arttıkça elektriksel özelliklerinin iyileştiği bilinmektedir. Tez çalışması süresince, farklı karbon miktarları içeren GaN örneklerinin manyetik, yapısal, optik özelliklerini irdelemek amacıyla X-Işını Kırınım Metresi (XRD), ESR, Fotolüminesans (PL), İkincil İyon Kütle Spektroskopisi (SIMS) ve Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) çalışmaları yapılmıştır. Elde edilen deneysel bulgular ile büyütülen GaN örneklerindeki karbon miktarı arasındaki ilişki değerlendirilmiştir. Bu çalışmalara ek olarak hasar/kusur durumunun, üç farklı seviyede karbon katkısı bulunan GaN örnekleri kullanılarak üretilen transistörlerin, fabrikasyon adımlarına bağımlılıkları da irdelenmiştir. XRD bulgularından, GaN epitaksiyel yapısı içerisine katkılanan karbon ile ilgili bilgi edinilmiştir. ESR bulguları, GaN epitaksiyel yapısındaki hasar merkezleri hakkında bilgi vermiştir. Aşındırma gücünün ESR sinyal şiddetini arttırdığı, tavlama süresinin ise ESR sinyal şiddetinde azalmaya neden olduğu görülmüştür. PL sonuçları, karbon katkılı GaN epitaksiyel yapısının 2,2 eV'da yayılım bandı verdiğini göstermiştir. AFM sonuçları, örneklerin içerdikleri karbon miktarı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığını göstermiştir. SIMS sonuçları, GaN epitaksiyel yapısına katkılanmış karbon miktarları hakkında nicel bilgi vermiştir.

Anahtar Kelimeler: GaN, XRD, ESR, PL, AFM, SIMS, Aşındırma, Tavlama

ABSTRACT

INVESTIGATION OF GaN THIN FILMS BY ESR SPECTROSCOPY

Kübra Elif ASAN

**Master of Science, Department of Nanotechnology and
Nanomedicine**

Supervisor: Prof. Dr. Şeyda ÇOLAK

June 06, 2018, 57 Pages

In this thesis; it is aimed to characterize GaN sample which has been widely used nowadays, especially in electronics sector. GaN epitaxial structures have been produced with different contents of carbon dopants by applying different production conditions and it is known that the electrical performance of the samples increase by the increasing amount of carbon dopant. In this thesis, for the purpose of examining the magnetic, structural, optical properties of GaN which have different doped carbon contents; XRD, ESR, PL, SIMS and AFM studies have been held. The relation with the obtained experimental findings; the amount of carbon found in the grown GaN samples have been evaluated. In addition, the fabrication production procedures have been investigated on the fabricated transistors which were based on GaN samples containing three different amounts of carbon dopants. By XRD findings, information on carbon doped into GaN has been obtained. ESR findings have given information about the damage centers found in GaN epitaxial structures. ESR signal intensities have increased by increasing power values of etching process and decreased by increasing duration of annealing process. PL results have indicated an emission band at 2.2 eV for the carbon-doped GaN. AFM results have shown that the surface roughness of the samples have been increased by increasing amount of carbon dopants. SIMS results have given quantitative information about the doped content of carbon in GaN.

Anahtar Kelimeler: Gallium Nitride (GaN), ESR, SIMS, XRD, AFM, etching, annealing.

TEŞEKKÜR

Çalışma kapsamında kullanılan örneklerin üretiminin ve karakterizasyonlarının yapılması adına Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (NANOTAM) bünyesindeki teknik olanakların kullanılmasını sağladığı için Prof. Dr. Ekmel Özbay'a,

Tez süresince kendisinden destek gördüğüm danışmanım Prof. Dr. Şeyda Çolak'a,

Tez süresince desteklerini esirgemediği, yol gösterici olduğu için Mustafa Öztürk'e,

Teknik anlamdaki bilgi birikimlerini ve psikolojik desteklerini esirgemeyen Sertaç Ural' a ve Ahmet Ömer Kayal'a,

Varlıkları sayesinde kendimi her zaman güçlü hissettiğim, doğru ya da yanlış yaptığım herşeyde arkamda duran babam Yücel Asan' a, annem Canan Asan'a, kardeşim Şeyda Asan' a

Sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL BİLGİLER	3
2.1. Galyum Nitrür (GaN) Yarıiletkeni.....	3
2.2. Galyum Nitrür (GaN) Epitaksiyel Yapısının Üretimi.....	5
2.3. Karbon Katkılı GaN Özellikleri.....	8
2.4. Elektron Spin Rezonans (ESR) Spektroskopisi.....	9
2.5. X-Işını Kırınım (XRD) Yöntemi	14
2.6. Fotolüminesans (PL) Ölçüm Sistemi	15
2.7. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM).....	15
2.8. İkincil İyon Kütle Spektroskopisi (SIMS) Yöntemi	16
3. DENEYSEL YÖNTEMLER.....	18
3.1. Üretim Sistemleri.....	18
3.1.1. Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD) Sistemi	18
3.1.2. Kuru Aşındırma Sistemi	19
3.1.3. Kaplama Sistemi.....	20
3.1.4. Tavlama Sistemi	20
3.2. Tez Çalışmasında Kullanılan GaN Örneklerinin Üretimi.....	21
3.2.1. GaN Örneklerini Hazırlama.....	21
3.2.2. MOCVD Yöntemi ile GaN Örneklerinin Büyütülmesi	22
3.2.3. Metalizasyon İşlemi.....	23
3.2.4. Tavlama İşlemi.....	23
3.2.5. Kuru Aşındırma İşlemi.....	24
4. DENEYSEL BULGULAR.....	25
4.1. X-Işınları Kırınım (XRD) Çalışmaları.....	25

4.2. Elektron Spin Rezonans (ESR) Çalışmaları	26
4.2.1. İşlem Görmemiş GaN İnce Filmlerinin ESR Çalışmaları	27
4.2.2. İşlem Görmemiş GaN İnce Filmlerinin Kavitedeki Yönelimine Bağlı ESR Çalışmaları	29
4.2.3. İşlem görmemiş GaN Örnekleri İçin Modülasyon Genliği ve Mikrodalga Çalışmaları	31
4.2.4. Farklı Metallerle Kaplanan GaN İnce Filmlerinin ESR Çalışmaları.....	35
4.2.5. Üretilen GaN Örneklerinde Tavlama (Isıl İşlem) Çalışmaları	36
4.2.6. Üretilen GaN Örneklerinde Aşındırma Çalışmaları	40
4.2.7. GaN Örneklerinin UV Işınlama Çalışmaları.....	43
4.2.8. GaN Örneklerinin X- Işını ile Işınlama Çalışmaları.....	46
4.3. Fotolüminesans (PL) ile Çalışmaları.....	47
4.4. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) Çalışmaları	48
4.5. İkincil İyon Kütle Spektroskopisi (SIMS) Çalışması	49
5. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	51
KAYNAKÇA.....	53
ÖZGEÇMİŞ	57

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Bazı yarıiletkenlerin özellikleri (300 K)	3
Çizelge 4.1. Farklı oranlarda karbon katkılanmış GaN örneklerinde SIMS çalışmaları sonucu hesaplanan karbon miktarları	50

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Yarıiletkenlerde a) direkt, b) indirekt bant aralığının şematik Gösterimi	4
Şekil 2.2. GaN altıgen (wurtzite) kristal yapısı.....	5
Şekil 2.3. Heteroepitaksiyel yapının üç farklı durumu (a) eşleşmiş kristal yapı, (b) gergin durum, (c) gerilme durumunun ortadan kalktığı gevşeme durumu	6
Şekil 2.4. GaN yapısı için iki farklı dizilim ve kendiliğinden kutuplanma vektörünün gösterimi	7
Şekil 2.5. AlGaIn/GaN epitaksiyel yapısı ara yüzeyinde oluşan iki boyutlu elektron gazının gösterimi	8
Şekil 2.6. Dış manyetik alan varlığında spinlerin enerji düzeyleri.....	9
Şekil 2.7. ESR Spektroskopisinde a) Soğurma Eğrisi, b) Birinci türev eğrisi ...	12
Şekil 2.8. (a) ESR spektrometresi, (b) Şematik gösterimi.....	14
Şekil 2.9. X-ışını Kırınımı	14
Şekil 2.10. Fotoluminesans ölçüm sistemi şematik gösterimi	15
Şekil 2.11. AFM sisteminin şematik gösterimi	16
Şekil 2.12. İkincil İyon Kütle Spektrometresinin (SIMS) şematik gösterimi	17
Şekil 3.1. MOCVD Cihazı	18
Şekil 3.2. MOCVD Cihazının Şematik Gösterimi.....	19
Şekil 3.3. Kuru Aşındırma Sistemi (ICP RIE).....	20
Şekil 3.4. Elektron demeti ile kaplama sisteminin şematik gösterimi.....	20
Şekil 3.5. Hızlı Termal Proses Sistemi (RTP – Rapid Termal Prosesing) şematik gösterimi.....	21
Şekil 3.6. Farklı alttaşlar üzerine büyütülen epitaksiyel yapılar (a) SiC alttaş, (b) Si alttaş, (c) farklı yapı, (d) safir alttaş.....	22
Şekil 3.7. DAD3220(Disco Automatic Dicing) Sistemi.....	23
Şekil 4.1. Farklı oranlarda karbon katkılı işlem görmemiş GaN örnekleri için XRD bulguları.....	25
Şekil 4.2. Farklı alttaş üzerine büyütülmüş ya da farklı katkılanmış GaN örneklerin ESR spektrumları (a) Safir alttaş- C ₃ :GaN (b) Safir alttaş-üzeri C ₂ :GaN (c) Safir – alttaş-C ₁ :GaN, (d) SiC alttaş- GaN (e) Safir alttaş Mg: GaN.....	28

Şekil 4.3. İşlem görmemiş GaN örneklerinin farklı kavite yönelimleri (açı) için kaydedilmiş ESR spektrumları (a) 0°, (b) 10°, (c) 20°, (d) 30°, (e) 90°, (f) 180°, (g) 270°, (h) 360°	30
Şekil 4.4. İşlem görmemiş GaN ince filmlerinin değişik mikrodalga güçlerinde kaydedilen ESR spektrumları (a) 0,5 mW, (b) 1 mW; (c) 2 mW; (d) 3 mW; (e) 5 mW; (f) 15 mW; (g) 32 mW; (h) 50 mW; (i) 63 mW; (j) 80 mW; (k) 100 mW	32
Şekil 4.5. İşlem görmemiş GaN ince filmlerinin tepeden tepeye ESR sinyal şiddetlerinin farklı mikrodalga gücündeki değişimleri	33
Şekil 4.6. İşlem görmemiş GaN ince filmlerinin ESR spektrumlarının değişik modülasyon genlik değerlerindeki ESR spektrumları.....	34
Şekil 4.7. Hazırlanan işlem görmemiş GaN ince filmlerinin ESR sinyal şiddetinin değişik modülasyon genliği değerlerindeki ESR sinyal şiddetlerinin değişimleri	35
Şekil 4.8. Farklı metal kaplanmış GaN örneklerinin ESR spektrumları a) C ₃ :GaN, b) C ₂ :GaN, c) C ₁ :GaN d) Cu kaplanmış GaN e) Ni kaplanmış GaN	36
Şekil 4.9. C ₃ :GaN örneği için 850°C' de tavlama işlemi sonrasında kaydedilen ESR sinyalleri (a) 15 s, (b) 30 s, (c) 60 s	37
Şekil 4.10. C ₂ :GaN örneği için 850°C' de tavlama işlemi sonrasında kaydedilen ESR sinyalleri (a) 15 s, (b) 30 s, (c) 60 s	38
Şekil 4.11. C ₁ :GaN örneği için 850°C' de tavlama işlemi sonrasında kaydedilen ESR sinyalleri (a) 15 s, (b) 30 s, (c) 60 s	39
Şekil 4.12. Farklı karbon katkılanmış GaN örneklerinin ESR spektrum alanlarının tavlama süresine bağlı değişimleri (a) C ₃ :GaN, (b) C ₂ :GaN, (c) C ₁ :GaN.....	40
Şekil 4.13. C ₃ :GaN örneği için aşındırma işlemi sonrasında kaydedilen ESR spektrumları (a) 30 W, (b) 50 W, (c) 100 W	41
Şekil 4.14. C ₂ :GaN örneği için aşındırma işlemi sonrasında ESR sinyalleri (a) 30, (b) 50, (c) 100 W	42

Şekil 4.15. C ₁ :GaN örneği için aşındırma işlemi sonrasında ESR sinyalleri (a) 30, (b) 50, (c) 100 W	42
Şekil 4.16. GaN örnekleri için farklı aşındırma güç değerlerinde kaydedilen ESR spektrumlarının alanlarının aşındırma gücüne bağlı değişimleri (a) C ₃ :GaN, (b) C ₂ :GaN, (c) C ₁ :GaN	43
Şekil 4.17. İşlem görmemiş GaN örneğinin farklı UV ışınlama süreleri için kaydedilen ESR spektrumları (a) 0, (b) 5, (c) 15, (d) 30, (e) 60, (f)110 dakika.....	45
Şekil 4.18. UV ışınlanmış GaN örneği için kaydedilen ESR spektrum alanlarının UV ışınlama zamanına bağlı değişimleri	47
Şekil 4.19. Farklı karbon katkılı örnekler için PL ölçüm sonuçları	48
Şekil 4.20. Farklı katkılanmış karbon değerlerine sahip GaN örneklerinin AFM görüntüleri (a) En yüksek (50 mbar), (b) orta (100 mbar), (c) en az (200 mbar) düzey karbon katkısı.....	49
Şekil 4.21. Farklı oranlarda karbon katkılanmış GaN örnekleri için SIMS ölçümü sonuçları	50

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

k.b.	Keyfi Birim
nm	Nanometre
β	Bohr manyetonu ($\beta = 9,27 \times 10^{-24}$ J/T)
H	Planck sabiti ($h = 6,6 \times 10^{-34}$ J.s)
k_{β}	Boltzmann Sabiti ($k_{\beta} = 1,38 \times 10^{-16}$ erg/K)
C	Curie Sabiti
H_0	Dış manyetik alan
g	Spektroskopik Yarıлма Çarpanı
J	Toplam Açısal Momentum
L	Yörünge açısal momentumu
S	Spin açısal momentumu
A	Aşırı ince yarıлма sabiti
I	Çekirdek Spin Operatörü
μ	Manyetik Moment
ω	Açısal Frekans
λ	Dalga Boyu
d	Atom düzlemleri arasındaki uzaklık
χ	Manyetik duygunluk

Kısaltmalar

2DEG	İki Boyutlu Elektron Gazı
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
GaN	Galyum Nitrür
ESR	Elektron Spin Rezonans
HEMT	Yüksek Elektron Mobiliteli Transistör
MD	Mikrodalga
MMIC	Monolitik Mikrodalga Entegre Devre

MOCVD	Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme
NANOTAM	Nanoteknoloji Araştırma Merkezi
RTP	Hızlı Termal Tavlama
UV	Mor ötesi
XRD	X-ışını Kırınımmetresi

1. GİRİŞ

Yarıiletken malzemeler; sağlık, kozmetik, elektronik uygulamalarda, özellikle askeri ve sivil savunmada sahip olduğu geniş kullanım alanından dolayı büyük önem taşımaktadır. Yarıiletken malzemeler cep telefonlarında, bilgisayarlarda, taşıtlarda, radarlarda, uydularda vb. birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Genel olarak ucuz ve kolay erişilebilir olmasından dolayı *silisyum (Si)*, birçok uygulamada tercih edilen bir yarıiletkendir. Ancak günümüzde yarıiletken teknolojisinde, özellikle periyodik cetvelde III-V grubunda bulunan elementler, kristal yapıdaki atomik düzenleri sebebiyle daha çok kullanılır hale gelmiştir. Bu atomik düzen ile oluşan geniş bant aralığı sayesinde III-V grubu yarıiletkenlerinden bazıları, yüksek frekans uygulamalarında ve yüksek güç uygulamalarında sıklıkla kullanılır [1-3]. Bunlardan *Galyum Arsenid (GaAs)* ve *Silisyum (Si)*, transistör teknolojisinde de kullanılmaktadır. Ancak 2014 yılından sonra *GaAs*, *Si* ve *Galyum Nitrür (GaN)* transistörleri arasında yapılan karşılaştırmada; yüksek çıkış gücü, yüksek verim ve düşük gürültü özellikleri sebebiyle *GaN* tercih sebebi haline gelmiştir. *GaN* yarıiletkeni, geniş bant aralığı (3,39 eV), yüksek kritik kırılma alanı ($3,3 \times 10^6$ V/cm), yüksek erime noktası (2791 K), vb. özellikleri nedeniyle diğer yarıiletkenlere oranla bazı üstünlüklere sahiptir [3,4]. Günümüzde *GaN* aygıt teknolojisi; yüksek hızlı Monolitik Mikrodalga Entegre Devre (MMIC), yükselteç gerektiren uydu haberleşme sistemleri, yüksek performanslı radarlar, yüksek kapasiteli kablosuz veri iletişim sistemleri, baz istasyonları, WiMAX sistemleri vb. gelişmiş haberleşme sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak dikkat edilmesi gereken durum, üretilen *GaN* epitaksiyel tabakasının büyütülmesi sırasında izlenen birçok adımın, *GaN* yapı kalitesini büyük ölçüde etkilediğidir. Üretim esnasında oluşabilecek nokta kusurları, anyon/katyon boşlukları, kirliplikler ve safsızlıklar *GaN* yapı kalitesini olumsuz etkilemekte ve sonuçta *GaN* kullanılarak üretilen aygıtlarda verimsizlikler oluşabilmektedir. Bu durumlarda gözlenebilecek problemlerden bazıları; yüzey kusurları sebebiyle üretilen aygıtlarda oluşabilecek akım kaçakları ve/veya güç düşmesi gibi aygıt kalitesini düşürebilecek etkilere [5,6]. Üretim esnasında karbon katkılanarak elde edilen yüksek dirençli *GaN* epitaksiyel yapısında aygıt izolasyonu yüksek seviyede sağlanır, akım kaçakları azaltılır ve yüksek aygıt performansı elde edilir [5]. Epitaksiyel yapıda katkılanan karbon miktarı ile akım kaçaklarının azaltılması sağlanır, kırılma gerilimi (dayanma gerilimi) artar ve kaçaklar azaltılarak

aygıt performansında artış sağlanabilir. Karbon katkılanmış *GaN*, genel olarak elektronik güç cihazlarında kullanılır [8-12]. Üretilen *GaN* yapısındaki kusurların, kristal yapı boşluklarının elektronik ve optik uygulamalardaki etkisinden dolayı tespiti oldukça önemlidir [13]. Bu bağlamda kullanılacak, yapı içindeki kusur merkezleri hakkında bilgi veren manyetik karakterizasyon yöntemlerinden birisi Elektron Spin Rezonans (ESR) tekniğidir.

Elektron Spin Rezonans (ESR) spektroskopisi, 1945 yılında ilk kez Rus bilim adamı Zavoisky tarafından gözlenmiştir. ESR spektroskopisi; malzemenin elektronik ve manyetik karakterizasyonu hakkında detaylı bilgi veren, güçlü ve hassas bir tekniktir. ESR tekniği kullanılarak, incelenen örneğe ait bazı spektral parametrelere ve malzemeyi niteleyen atom ve molekül bazında birçok önemli bilgilere ulaşmak mümkündür [7]. ESR yöntemi, incelenen yapı içerisindeki kusur merkezleri, yapı boşlukları, ışınlama, mekanik vb. dış etkiler sonucunda oluşabilecek serbest radikaller ve yapıdaki çiftlenmemiş elektronların varlığı hakkında bilgi verir [14-16]. Katıhal uygulamaları için de ESR oldukça uygun bir teknik olarak kabul edilmektedir [16].

Bu tez çalışması kapsamında; NANOTAM'da üretilen Yüksek Elektron Mobiliteli Transistör (HEMT) ve MMIC fabrikasyonlarında kullanılan *GaN* epitaksiyel yapısının kusur analizleri yapılarak fabrikasyon kalitesi için bir öngörü oluşturulması amaçlanmıştır. *GaN* yapılarında aygıt performansını yükseltebilmek için epitaksiyel yapı büyütülürken yapılabilecek işlemlerden bir tanesi, yapı içerisine karbon katılmaktır. Bu çalışmanın esası, farklı oranlarda karbon katkılanmış *GaN* örneklerinin özelliklerinin ağırlıklı olarak ESR tekniği ile incelenmesi ve diğer tamamlayıcı tekniklerle de elde edilen bulguların ilişkilendirilmesidir.

2. KURAMSAL BİLGİLER

2.1. Galyum Nitrür (GaN) Yarıiletkeni

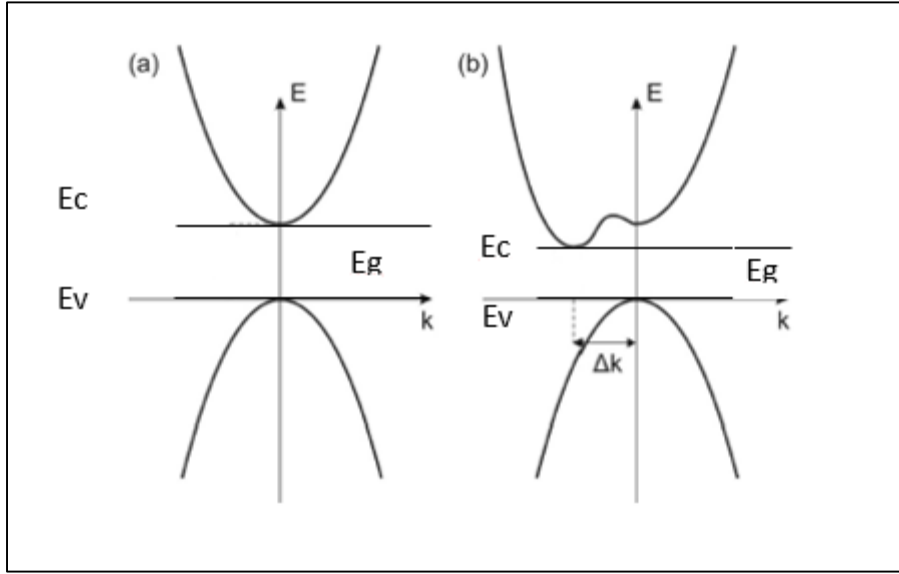
Periyodik cetvelde III - V grubunda bulunan atomlar genelde kovalent, daha düşük oranda da iyonik bağ yaparlar. Buna karşın *GaN*'in yapısındaki azot yarıçapının küçük olması ve yüksek elektronegatifliğe sahip olması nedeni ile daha çok iyonik bağ gözlenir. Pauling iyonizasyon kriterlerine göre; *GaN* için 0,387 olan iyoniklik, *GaAs* için 0,039'dur [3]. İyoniklik özelliğinin yüksek olması, yapıda daha sıkı ve daha kısa bağ özelliklerinin sağlandığı anlamına gelir. Bu açıdan *GaN* ile *GaAs* karşılaştırıldığında; *GaN*'in daha sert ve yüksek kimyasal kararlılığa sahip olduğu görülür. Birçok malzeme ile karşılaştırıldığında; *GaN*'in termal iletkenlik, enerji bant aralığı ve kırılma gerilimi alanı gibi özelliklerinin oldukça öne çıktığı görülmüştür. Bazı yarıiletkenlere ait genel özellikler *Çizelge 2.1*'de gösterilmiştir [3].

Çizelge 2.1. Bazı yarıiletkenlerin temel fiziksel özellikleri (300 K)

Malzeme	Bant Aralığı E_g (eV)	Kristal Sabiti (Å)	Mobilite ($\text{cm}^2 \times \text{V}^{-1} \times \text{s}^{-1}$)	Termal İletkenlik ($\text{V} \times \text{cm}^{-1} \times ^\circ\text{C}^{-1}$)	Kırılma Alanı ($\text{V} \times \text{cm}^{-1}$)
<i>GaN</i>	3,4 Direkt	a =3,189 c=5,186	Elektron=1000 Boşluk=200	1,5	$>5 \times 10^6$
<i>Si</i>	1,1 Dolaylı	5,431	Elektron=1400 Boşluk =450	1,5	3×10^5
<i>GaAs</i>	1,4 Direkt	5,653	Elektron=8500 Boşluk =400	0,5	4×10^5
6H – SiC	2,9 Dolaylı	a=3,073 c=10,053	Elektron=600 Boşluk =40	5,0	4×10^6

Direkt bant aralığı; kristal yapıdaki değerlik bandının maksimum olduğu nokta ile iletkenlik bandının minimum olduğu noktanın aynı kristal momentumunda hizalanması anlamına gelmektedir. Dolaylı bant aralığı için, iletkenlik bandı alt kenarı ile değerlik bandı üst kenarı aynı kristal momentumda olmayıp Δk kadar bir ayrışma söz konusudur. Direkt ve dolaylı bant aralığının şematik gösterimi *Şekil 2.1*'de verilmiştir.

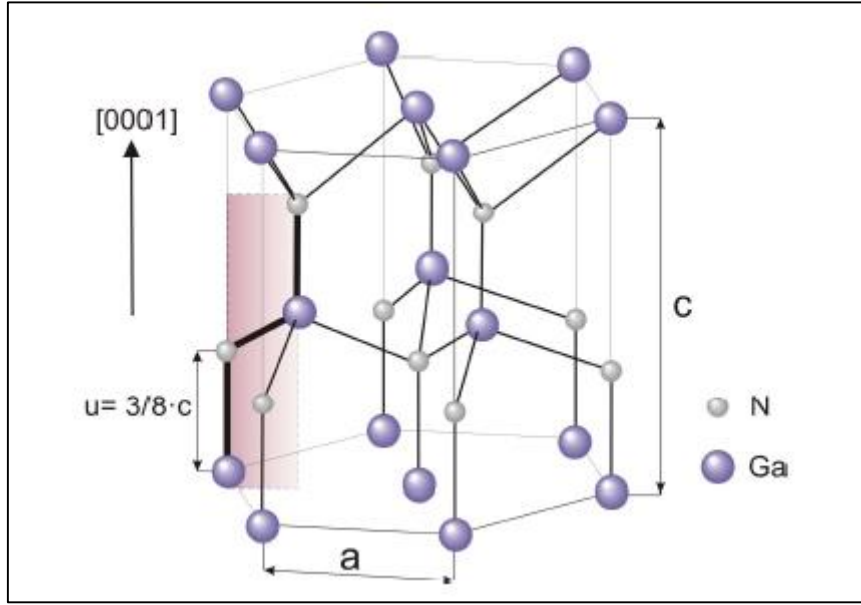
Yarıiletken aygıt teknolojisinde, elektron ve boşluklar arasındaki iletim sonucu aygıtın çalışması sağlanmaktadır. Yarıiletkenin direkt bant aralığına sahip olması daha verimli birleşmeler ve foton üretimi sağlayacaktır. İndirekt bant aralığında elektron ve boşluk aynı hızda olmayacaktır. Δk kadar olan bu farkı fonon yayarak ya da soğurarak kapatacaktır. Dolayısıyla direkt bant aralığı, dolaylı bant aralığına göre aygıt üretiminde daha verimlidir.



Şekil 2.1. Yarıiletkenlerde **a)** direkt, **b)** indirekt bant aralığının şematik gösterimi

Yüksek enerji bant aralığı sonucunda oluşan yüksek kırılma alanı, *GaN* tabanlı cihazların daha yüksek gerilim altında çalışabilmesine olanak tanımaktadır. *GaN*'nin yüksek yük taşıma mobilitesi, bu yarıiletkenin yüksek frekans uygulamalarında kullanılabilmesini sağlar. Yüksek termal iletkenlik özelliği ise, yüksek sıcaklık uygulamalarında sıcaklığın malzeme içerisinde hızlı ve homojen dağılmasını sağlamaktadır. Bütün bu özellikleri sayesinde *GaN* tabanlı cihazlar diğer malzemelere göre, yüksek güç, yüksek frekans, yüksek sıcaklık ve radyo frekansı uygulamalarında, radarlarda, transistörlerde daha çok tercih edilir hale gelmiştir [3].

GaN'in kristal yapısını oluşturan atomik bağlar tetrahedral koordinasyonu belirleyen sp^3 hibritleşmesi yapmaktadır. Yani her bir galyum atomunun etrafında dört tane azot atomu ya da her bir azot atomunun etrafında dört tane galyum atomu bulunmaktadır. *GaN* atomları, tetrahedral olarak koordine edildiği iki kristal yapıya sahiptir. Bunlardan birisi kübik çinko fazı, diğeri wurtzite altıgen fazdır. *GaN* ile ilgili gerçekleştirilen araştırmalar genel olarak altıgen yapıya sahip örnekler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Çünkü kübik fazdaki *GaN* kristalinin büyütülmesi zor ve büyütülen yapının kararlılığı düşüktür. Wurtzite *GaN*, Şekil 2.2'de verilen içiçe geçmiş iki altıgen sıkı paket kristal yapıdan oluşmaktadır [3].

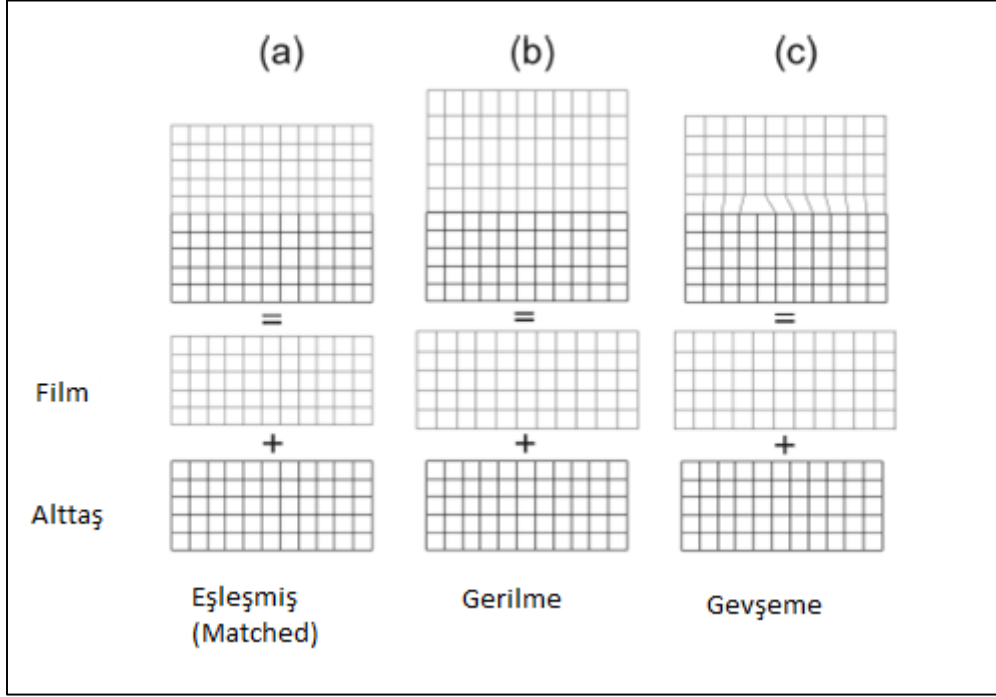


Şekil 2.2. GaN altıgen (wurtzite) kristal yapısı [3]

2.2. Galyum Nitrür (GaN) Epitaksiyel Yapısının Üretimi

Epitaksiyel kelimesi iki Yunanca kelimenin birleşmesi sonucu oluşmuştur. *Epi* kelimesinin anlamı üzerinde veya üstünde, *taksi* kelimesinin anlamı ise düzenlemedir. Bu terim, bir alttaş üzerinde bir tek kristal filmin oluşması anlamına gelmektedir. Bu üretim yönteminde alttaşın üzerine büyütülen ince filmin kristal yapısı, büyük ölçüde alttaşın kristal parametrelerinden etkilenmektedir. *Homo-epitaksi* ve *hetero-epitaksi* olmak üzere iki çeşit epitaksiyel yapı bulunmaktadır. Eğer alttaş ile üzerine büyütülen malzeme aynı ise, bu yapı ***homo-epitaksi*** olarak adlandırılır. Bu filmler genellikle yüksek kaliteye ve düşük kusur seviyesine sahiptir. Eğer alttaşın üzerine büyütülen malzeme, alttaş ile aynı kristal yapıya sahip farklı bir malzeme ise bu yapı ***hetero-epitaksiyel*** olarak adlandırılır. Büyütülen malzemenin kristal parametreleri alttaş ile aynı ise, eşleşme *Şekil 2.3a*'daki gibi olacaktır. Çoğu zaman iki malzemenin örgü parametreleri birbirinden farklıdır ve bu durum epitaksiyel yapı ile alttaş ara yüzeyinde bağ gerilmesine sebep olur (*Şekil 2.3b*). Farklı örgü parametresine sahip olan film büyürken, belirli bir kritik kalınlığı geçtikten sonra bu bağ gerilmesinde bir gevşeme söz konusu olacaktır (*Şekil 2.3c*) [3,17]. *Şekil 2.3*'de görüldüğü gibi, alttaş üzerine kristal ince filmin büyütülmesinde alttaş ve filmin kristal uyumunun önemi oldukça büyüktür. Kristal yapılar arasındaki uyumsuzluklar genel olarak bu yapıların arasına büyütülen kristal yapıyı düzenleyici malzemelerle giderilmektedir. Bu malzemeler ara katmanlarda örgü yapısının

uyumunu sağlamak amacıyla kullanıldığından, üst üste büyütülecek malzeme türüne bağlı olarak değişiklik gösterebilir.



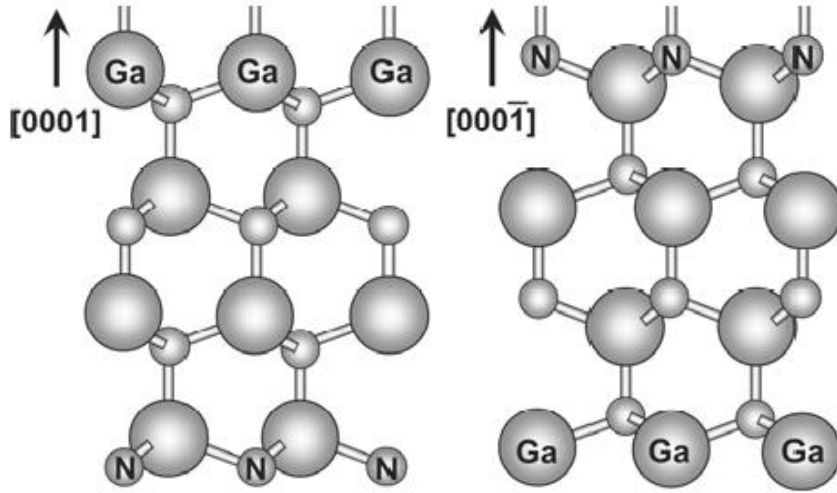
Şekil 2.3 Heteroepitaksiyel yapının üç farklı durumu **(a)** eşleşmiş kristal yapı, **(b)** gergin durum, **(c)** gerilme durumunun ortadan kalktığı gevşeme durumu

Epitaksiyel yapılar genel olarak Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD, Chemical Vapor Deposition) yöntemi ile üretilmektedir. CVD yöntemi ile büyütme sırasında yüksek saflık sağlanabilmesi ve katılanacak malzemenin kontrol edilebilmesi sayesinde, optik ve elektriksel özellikleri ayarlanabilen malzemelerin üretilmesi mümkündür.

Kimyasal buhar biriktirme yöntemlerinden olan Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD) yöntemi ise, özellikle *GaN* epitaksiyel yapısının üretiminde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. MOCVD yöntemi ile, periyodik cetvelde III-V grubu yarıiletkenlerinden olan *GaAs* ilk olarak 1968 yılında, Manasevit tarafından büyütülmüştür. 1971 yılında ise Manasevit ve arkadaşları tarafından ilk olarak *GaN* ve *AlN*, MOCVD sistemi ile büyütülmüştür [18]. Ancak bu çalışmada büyütülen filmin düşük saflık seviyesinde olması ve kontrolsüz büyütme yapılmış olması sebepleri ile *GaN* kalitesi istenilenden oldukça uzak olmuştur. MOCVD ile kontrollü *GaN* büyütme işlemi ise ilk olarak 1986 yılında, Amano ve Akasaki tarafından yapılmıştır. MOCVD sistemi ile çoklu üretim yapılabilmesi ve üretim süresinin diğer yöntemlere oranla daha kısa olması nedenleri ile bu yöntem ticari olarak MBE (Molecular Beam Epitaxy) ve VPD (Vapor Phase Deposition) yöntemlerine kıyasla daha öndedir [18].

GaN'ın etkili kullanım alanlarından birisi transistör üretimidir. Transistör üretimi için büyütülen epitaksiyel yapıda her bir katmanın ayrı bir özelliği bulunmaktadır. Yapıda *AlGaN/GaN* kristal yapıları üst üste büyütülmüştür. Farklı özellikleri olan çok katlı kristal ince filmlerin *AlGaN/GaN* katmanları arasında iki boyutlu elektron gazı oluşur. Bu gazın kontrolü ile transistörün çalışması da kontrol edilir. İki boyutlu elektron gazının oluşumu aşağıda açıklanmıştır.

AlGaN/GaN epitaksiyel yapıları arasında kendiliğinden kutuplanma ve piezoelektrik kutuplanma oluşur. Kendiliğinden kutuplanma, kristal yapının düzenleniminde azot atomlarının negatif etkisi sonucunda oluşmaktadır. Üst üste büyütülen katmanlar arasındaki örgü parametresindeki uyumsuzluk sebebiyle oluşan gerilim; kendiliğinden kutuplanmaya ek olarak, bir piezoelektrik kutuplanma oluşumunu da sağlayacaktır. Piezoelektrik kutuplanmada, kristal yapıları aynı ancak kristal parametreleri farklı olan yapılar arasında gerilme durumu oluşur. Bu oluşan iki kutuplanmanın etkisiyle iki boyutlu elektron gazı oluşur. Şekil 2.4'de görüldüğü gibi, *GaN* yapısının *N-yüzeyli* ya da *Ga-yüzeyli* olması, kendiliğinden kutuplanma vektörünün yönünü değiştirecektir [19, 20]. Yapıda oluşan toplam kutuplanma, bu iki kutuplanmanın toplamı kadar olacaktır (Eşitlik 2.1).

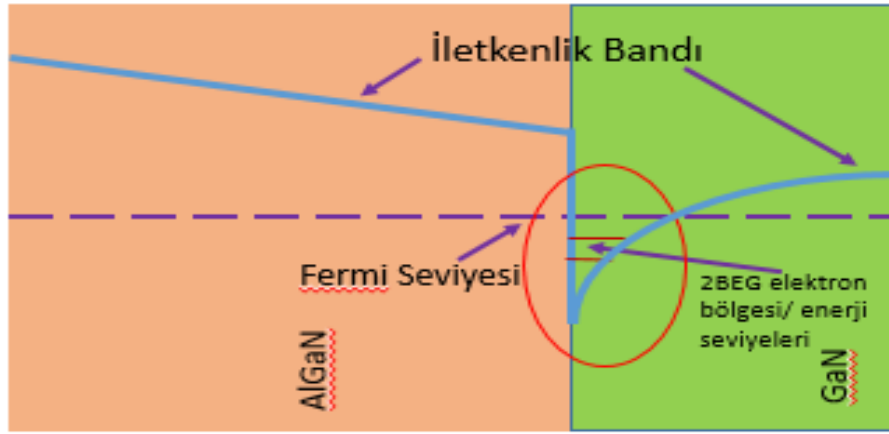


Şekil 2.4. *GaN* yapısı için iki farklı dizilim

$$\vec{P}_{top} = \vec{P}_{pk} + \vec{P}_{kk} \quad (2.1)$$

Bu kutuplanmalar sonucunda oluşan iki boyutlu elektron gazı sayesinde, kristal yapı kusurlarından ve kirliliklerden kaynaklanan saçılmaların etkisi azaltılarak, yüksek

elektron mobiliteli epitaksiyel yapılar elde edilmesi mümkündür. AlGaN/GaN ara yüzeyinde iki boyutlu elektron gazının oluşumu Şekil 2.5'de gösterilmiştir [21-22].



Şekil 2.5. AlGaN/GaN epitaksiyel yapısı ara yüzeyinde oluşan iki boyutlu elektron gazının gösterimi

2.3. Karbon Katkılı GaN Özellikleri

MOCVD yöntemi kullanılarak GaN epitaksiyel yapı büyütülürken, üretim koşullarına bağlı olarak, yapı içerisinde *azot boşlukları*, *galyum boşlukları*, *kristal kusurları* ve *hasarlar* oluşabilmektedir. Bu durum, oluşturulan çok katlı kristal yapıdan üretilen aygıtın kalitesini doğrudan etkilemektedir. Büyütülen GaN yapısına magnezyum (*Mg*), oksijen (*O₂*), silisyum (*Si*), demir (*Fe*) ve karbon (*C*) vb. malzemeler katkılanarak aygıtın performansı artırılabilir [23-25]. *Mg* genel olarak optik uygulamalarda, *C* ve *Fe* yüksek direnç sağlayarak akım kaçaklarını azaltabilmeleri nedeniyle yüksek elektron mobiliteli transistörlerde kullanılmaktadır. Magnezyum (*Mg*), demir (*Fe*) ve karbon (*C*) katkı malzemelerinin GaN epitaksiyel yapılarında kullanılmasının sebebi, bu malzemelerin yapıdaki azot boşluklarını doldurmada etkili olmalarıdır [12].

Bu tez çalışmasında, *karbon katkılı GaN* (GaN:C) örnekleri büyütülmüş ve incelenmiştir. MOCVD yöntemi kullanılarak *GaN* epitaksiyel yapı büyütülürken, karbon katkısı vakum kazanındaki (reaktör) büyütme basıncı ile sağlanır. MOCVD prosesinde; proses basıncı ne kadar düşükse, yapı içersine katkılanan karbon miktarının o oranda artması beklenir. Yapıdaki karbon katkısının artması ile birlikte malzemenin elektriksel direncinin arttığı ve akım kaçaklarının azaldığı bilinmektedir [9,10].

2.4. Elektron Spin Rezonans (ESR) Spektroskopisi

Spektroskopi; Kuantumlanmış iki enerji düzeyi arasındaki geçişe karşılık gelen çizgiyi inceleyen yöntem spektroskopi denir. Geçişlere karşılık gelen çizgilere spektral çizgi ya da spektrum adı verilir [26-28].

Elektron Spin Rezonans (ESR) tekniğinin temeli, *Stern - Gerlach* deneyine dayanmaktadır. 1920 yılında *Otto Stern* ve *Walther Gerlach* isimli iki fizikçi tarafından yapılan bu deneyde, değişken manyetik alan içerisindeki gümüş atomunun manyetik momentinin beklenmedik yönelme gösterdiği gözlemlenmiş ve elektron spin kavramına ulaşılmıştır. 1925 yılında, *Uhlenbeck* ve *Goudsmit*, elektronun manyetik momenti ile spin açısal momentum kavramlarını birleştirmiş ve yapılan bu deneyin teorik alt yapısını kurmuşlardır. Daha sonra *Breit* ve *Rabi*, manyetik alanda hidrojen atomunun enerji düzeylerine açıklık getirmişlerdir. *Rabi*, titreşen bir manyetik alan tarafından indüklenen seviyeler arasındaki geçişler hakkında çalışmalar yapmış ve elde ettiği bulgularla *Manyetik Rezonans* spektroskopisinin temelini atmıştır. *CuCl₂* örneği kullanılarak gözlenen ilk ESR spektrumu, 1945 yılında Rus bilim adamı *Zavoisky* tarafından kaydedilmiş ve bu konudaki gelişmeler hız kazanmıştır. Ancak 1952 yılında serbest radikallerin incelendiği ESR sinyalinin ardından, ekipman eksikliği nedeniyle gelişmeler yavaşlamıştır [29]. Günümüzdeki teknolojik gelişmeler ise ESR spektroskopisinin organik yapılar, yarıiletkenler ve katı hal örnekleri için kullanım alanını arttırmıştır.

Elektronlar kendi spinlerinin sağladığı bir manyetik dipol momente sahiptir. Elektronların çift olarak bulunduğu sistemlerde net manyetik dipol moment değeri sıfırdır. ESR paramanyetik sistemleri incelemektedir. Bu paramanyetik etkiler atom ya da moleküllerin çiftlenimsiz elektronlara sahip olması ile sağlanır [26-29]. Bu sistemler; yarıiletkenler, metaller, yarımetaller, geçiş metal iyonları, çiftlenimsiz elektron içeren sistemler, kimyasal ya da fiziksel yollarla oluşturulan hasar sonrası oluşan serbest radikaller vb. türde örnekler olabilirler. Aynı zamanda kimyasal tepkime ile elde edilen iyonlar, ışınlanma ile elde edilen uzun ya da kısa ömürlü serbest radikaller ve renk merkezleri de ESR yöntemi ile incelenebilen örnekler arasındadır.

Bir spektroskopik yöntemde soğurma olayının gerçekleşebilmesi için incelenen örneğe, örneğin moleküler enerji seviyeleri arasındaki farka eşit enerjili bir

elektromanyetik dalga gönderilmesi gerekir [26-28]. Bu olay, *rezonans* olarak isimlendirilir ve temelde örneğe gönderilen fotonun frekansının, sistemin doğal titreşim frekansına eşit olması durumunda gözlenir.

ESR yönteminde, H_0 dış manyetik alanı içerisine yerleştirilen serbest elektron için manyetik moment μ ve dış manyetik alan (\mathbf{H}_0) arasındaki açı θ ise, etkileşimin ifadesi enerji hamiltoniyeni ile verilir. $\mu_z = \mu_e \cos\theta = -g_e \beta S_z$ bağıntıları kullanıldığında, sistemi niteleyen hamiltoniyen “Eşitlik 2.2” ve “Eşitlik 2.3” bağıntıları ile verilir.

$$\mathcal{H} = -\vec{\mu}_e \cdot \vec{H}_0 = -\mu_e H_0 \cos\theta \quad (2.2)$$

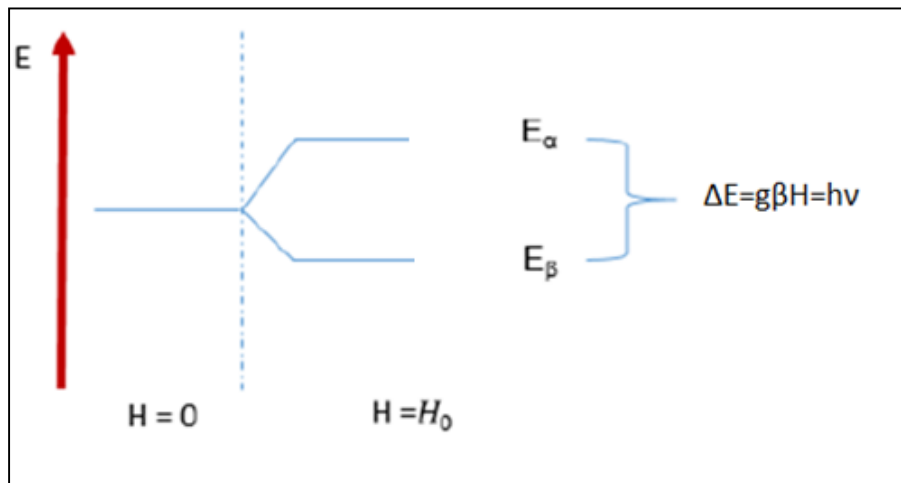
$$\mathcal{H} = g_e \beta H_0 S_z \quad (2.3)$$

Bağıntıda (“Eşitlik 2.3”) geçen S_z , spin operatörünün z kuantumlanma doğrultusundaki vektörüdür, alabildiği değerler $\pm 1/2$ ’ dir. g_e , serbest elektron spektroskopik yarıma çarpanıdır ve değeri 2,0023’ dür. β ise Bohr manyetonudur ve değeri $9,27 \times 10^{-24}$ J/T’ dir. $g_e \beta H_0$ skaler olduğu için S_z ’nin özfonksiyonları, $|\alpha\rangle$ ve $|\beta\rangle$ aynı zaman da sistemi niteleyen hamiltoniyenin özfonksiyonlarıdır. Bu durumda enerji özdeğerleri, “Eşitlik 2.4” ve “Eşitlik 2.5” de verildiği gibidir.

$$E_\alpha = \frac{1}{2} g_e \beta H_0 \quad (2.4)$$

$$E_\beta = -\frac{1}{2} g_e \beta H_0 \quad (2.5)$$

Bağıntılarda geçen $|\alpha\rangle$ ve $|\beta\rangle$ enerji düzeylerinin dış manyetik alan uygulanmadan ($H=0$) önce ve H_0 manyetik alanı uygulandıktan sonraki durumları Şekil 2.6’da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Dış manyetik alan varlığında spinlerin enerji düzeyleri

E_{β} alt enerji düzeyinde bulunan bir elektronun, E_{α} üst enerji düzeyine geçebilmesi için, ΔE enerji farkına eşit bir MD enerjisi soğurması gerekir. Soğurulan mikrodalga enerjisi ile enerji farkının bağıntısı aşağıdaki gibidir.

$$h\nu_0 = \Delta E \quad (2.6)$$

Bu çizgisel bağıntı rezonans koşulunu ifade etmektedir (Eşitlik 2.6). Bağıntıda geçen h Planck değişmezi, ν_0 ise MD'nın frekansıdır. Bu eşitlik E_{α} ve E_{β} enerjilerinin farkı alınarak, "Eşitlik 2.7" ile verilir;

$$h\nu_0 = g_e\beta H_0 \quad (2.7)$$

ESR spektrumları farklı örneklerde farklılıklar gösterebilir. Bunun sebebi paramanyetik merkezlerin (iyon ya da radikal) manyetik momentleri ile serbest elektronun manyetik momentinin eşit olmamasıdır. Sistemi niteleyen toplam açısal momentum, yapıdaki elektronların toplam spin ve toplam yörünge açısal momentumlarının çiftlenmesi ile tanımlanır ve "Eşitlik 2.8" bağıntısı ile verilmiştir. Yörünge ve spin açısal momentum ifadeleri "Eşitlik 2.9" ve "Eşitlik 2.10" eşitlikleri ile verilmiştir [26-28].

$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S} \quad (2.8)$$

$$\vec{L} = \sum_i \vec{l}_i \quad (2.9)$$

$$\vec{S} = \sum_i \vec{s}_i \quad (2.10)$$

Aşırı ince yapı etkileşmesi; çiftlenimsiz elektronun üzerinde olduğu çekirdekte ya da komşu çekirdeklerle etkileşmeler durumunda oluşur. Çiftlenimsiz elektronun bağlı bulunduğu çekirdek veya komşu çekirdeklerin spin kuantum sayılarının sıfırdan farklı olması durumunda, elektronun manyetik momenti, uygulanan dış manyetik alanın yanısıra çekirdek ve komşu çekirdeklerin oluşturduğu manyetik alanların da etkisinde kalır. Bu etkileşme sonucunda enerji düzeylerinde gözlenen yarılmalara, **aşırı ince yapı yarılmaları** denir. Aşırı ince yapı etkileşmesi, **yönsemez** ve **yönser** olmak üzere iki grupta incelenir.

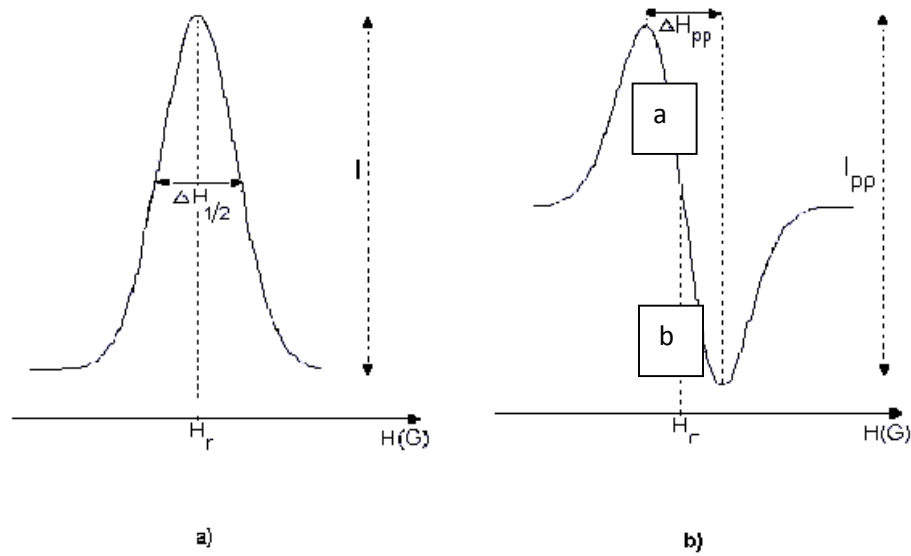
Serbest radikaller, çiftlenimsiz elektron bulunduran sistemlerdir. Serbest radikaller; kararlı veya kararsız olabilirler. Kararsız serbest radikaller ise kısa sürede sönmeye uğrarlar. Bir örnek içinde doğal yollardan oluşmuş radikaller olabileceği gibi, bu

örneğe uygulanacak mekanik etki, sıcaklık etkisi ve kimyasal etkiler ile veya örneği görünür ışık, UV, X veya γ -ışınlarına maruz bırakarak da örnekte serbest radikal oluşturmak mümkündür.

ESR tekniği ile serbest radikal miktarı hakkında bilgi alınabilir. Bu teknik oldukça yüksek seçiciliğe ve yüksek duyarlılığa sahip olduğu için radikalleri ve radikallerin katıldığı tepkimelerin incelenmesini sağlar.

ESR Spektrometresinin Çalışma İlkesi

ESR spektroskopisinde ya dış manyetik alan sabit tutulup rezonans koşulunu sağlayan frekans ayarlanır ya da frekans sabit tutulup dış manyetik alan rezonans koşuluna göre ayarlanır. ESR spektrumunda gürültünün azaltılması ve duyarlılığın artırılması amaçlarıyla, üretilen spektrometreler genellikle sistemin frekansı sabit tutulup manyetik alan değiştirilerek ve soğurma eğrisinin birinci türevini alacak şekilde tasarlanır. İncelenen örneğin kaydedilen ESR spektrumundan, spektroskopik yarıлма çarpanı (g değeri), tepeden tepeye çizgi genişliği (ΔH_{pp}), aşırı ince yapıtı sabiti (A) vb. deneysel spektral parametreler belirlenir. ESR yönteminde elde edilen spektrum çizgileri Şekil 2.7’de verilmiştir [30].



Şekil 2.7. ESR Spektroskopisinde **a)** Soğurma Eğrisi, **b)** Birinci türev eğrisi.

Şekil 2.7’de görülen H_r incelenen örneğin rezonans alan değerini, ΔH_{pp} tepeden-tepeye çizgi genişliğini, I_{pp} ise ESR sinyal şiddetini göstermektedir. Soğurma

eğrisinin altında kalan alan veya çizgi genişliğinin sabit olması durumunda birinci türev eğrisinin tepeden tepeye yüksekliği, örneğin sahip olduğu manyetik birimlerin sayısı hakkında bilgi vermektedir.

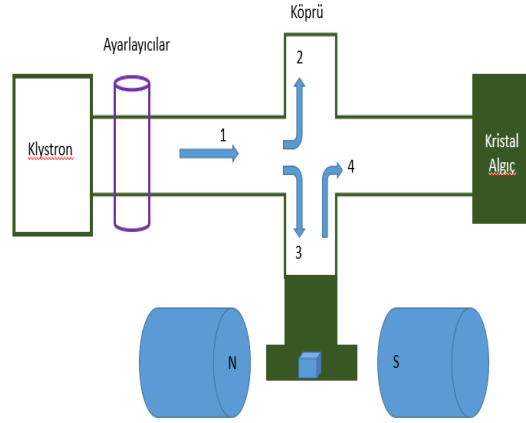
ESR spektroskopisinde deneysel işlem; oldukça şiddetli bir dış manyetik alan içerisine yerleştirilmiş manyetik sistemde oluşan enerji düzeyleri arasında, ikincil olarak uygulanan zayıf bir MD alanı sonucu uyarılan geçişleri gözlemektedir. Bu nedenle deneysel teknik; manyetik alan kaynağı, MD kaynağı, dedektör sistemi olmak üzere üç temel ögeden oluşmaktadır. Bu ögelerden **manyetik alan kaynağı**, soğutmalı elektromıknatıslardan yararlanılarak güçlü dış manyetik alanı sağlar.

Mikrodalga kaynağı; enerji düzeyleri arasındaki geçişi sağlayacak elektromanyetik dalgadır. Oyuk içerisine yerleştirilen spin sistemi üzerinde bir elektromanyetik alan oluşturacak mikrodalga kaynağı kullanılır. **Dedektör sistemi** ise, manyetik sistem tarafından soğurulan enerjiyi algılayan sistemdir. Bu amaçla kristal algıçlar kullanılmaktadır [27].

Şekil 2.8(a)'da bu çalışmada kullanılan Bruker EMX X-Band ESR spektrometresi, Şekil 2.8(b)'de ise bu sistem şematize edilmiş hali görülmektedir. ESR spektrometresinin çalışması esnasında, Şekil 2.8(b)'de gösterilen mikrodalga kaynağından elde edilen elektromanyetik enerji köprüye gelir. Uygun ayarlamadan sonra 1 kolundan gelen enerjinin bir kesimi 2 ve öteki kesimi de 3 koluna gider. Bu durumda 4 koluna enerji ulaşmadığı için kristal algıç çıkış akımı okuyamaz. Rezonans koşulu sağlandığı durumda ise 3. kolun sonunda bulunan oyuk içindeki spin sistemi MD enerjisinden enerji soğuracağı için, köprüdeki enerji dengesi bozulur ve böylece 4 koluna sıfırdan farklı bir sinyal ulaşır, yani kristal akımı artar. O halde sistem üzerine uygulanan manyetik alanın rezonans değerine ulaşması için yavaş yavaş değiştirilmesine bağlı olarak, kristal algıçta oluşan akımın maksimum değeri okunur ve ESR spektrumu olarak kaydedilir [28].



(a)



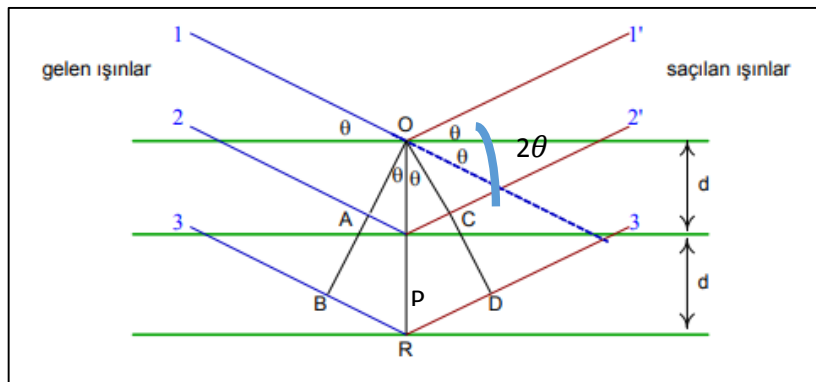
(b)

Şekil 2.8. (a) ESR spektrometresi, (b) ESR spektrometresinin şematik gösterimi

2.5. X-ışını Kırınım (XRD) Yöntemi

X-ışını Kırınım yöntemi, kristallerin kendine özgü atomik dizimlere sahip olması esasına dayanır. Bir kristale gönderilen X-ışını, düzenli kristal yapı tarafından saçılır. X-ışını kırınım metresinin çalışmasındaki temel prensip, kristal yapı parametreleri ile aynı dalgaboyu mertebesindeki X-ışını yapı üzerine gönderilerek, kırınıma uğraması ile sağlanır. X-ışını kullanılarak, bu tez çalışmasında büyütülmüş GaN film yapısı hakkında da birçok bilgi alınabilir.

Şekil 2.9'da X-ışını kırınım yönteminde, kristal yapı ve elektromanyetik dalganın etkileşimi gösterilmiştir. Kristal yapı parametreleri ile ilgili bilgilere Bragg Yasası ("Eşitlik 2.11") ile ulaşılır.



Şekil 2.9. X-ışını Kırınımı

Şekil 2.9'da görüldüğü gibi, yüzeye θ açısı ile gönderilen X-ışınının bir kısmı yüzeyden, bir kısmı ise diğer katmanlardan saçılır. Eşitlik 2.11'de gösterilen Bragg yasasına göre kırınıma uğrayan X-ışınlarından düzlemler arasındaki mesafenin bilgisi alınır.

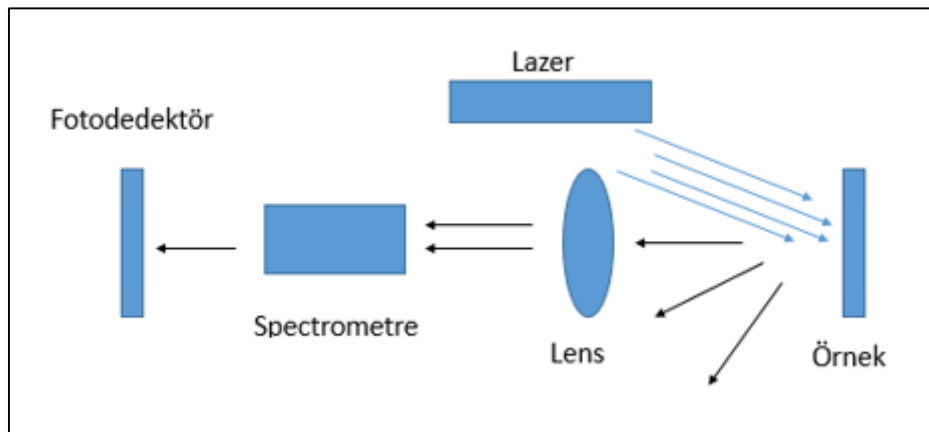
$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (2.11)$$

Bu yöntemde X-ışınının saçılma açısı 2θ ölçülerek düzlemler arasındaki mesafe hesaplanır. Ayrıca kırınıma uğrayan ve saçılan her ışının toplamı da yapı faktörünü verecektir. Yapı faktörü yardımıyla da birim hücredeki atomik dizilim bilgisi elde edilir [31].

2.6. Fotolüminesans (PL) Ölçüm Sistemi

Fotolüminesans (PL) ölçümleri, incelenen örneğin optik özellikleri, yayılım bandı hakkında bilgi verir. Bu tez çalışmasında, büyütülen GaN epitaksiyel yapıların optik özellikleri PL yöntemi ile belirlenmiştir.

Bu ölçümde malzemenin üzerine, kendi bant aralığından daha yüksek enerjili bir UV ışını gönderilerek malzeme uyarılır. Uyarılma işleminin ardından salınan fotonun enerjisi, malzemenin karakteristik bir özelliğidir. Şematik olarak PL sistemi Şekil 2.10'da verilmiştir [31].



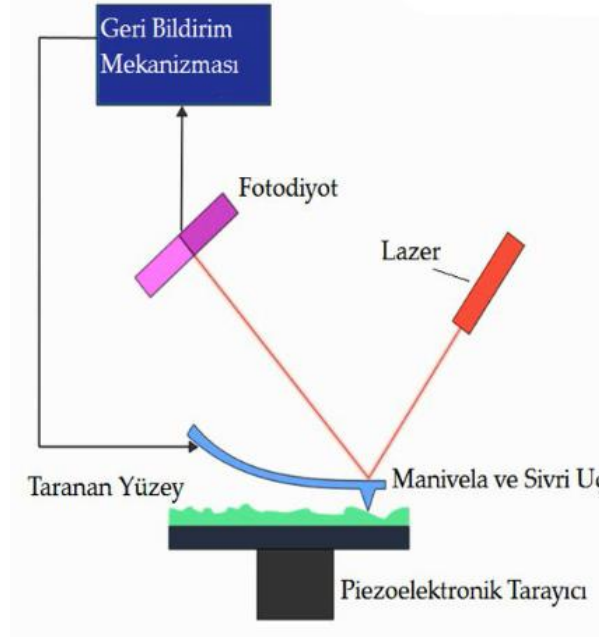
Şekil 2.10. Fotolüminesans ölçüm sistemi şematik gösterimi

2.7. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) kullanılarak, incelenen örneğin atomik düzeyde yüzey özellikleri hakkında bilgi edinmek mümkündür. Yüzey pürüzlülüğü, yüzey kusurları hakkında bilgi verir. Bu tez çalışmasında, AFM ile GaN'ın yüzey

pürüzlülüğü hakkında bilgi edinilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü doğrudan aygıt performansı ile ilişkilidir.

AFM sisteminde, yüzey bir tip ile taranır. Bu tipin takılı olduğu manivelanın sapmasıyla birlikte fotodiyota yansıyan lazer ışığı da sapar. Uç ile yüzey arasındaki kuvvetin sabit tutulması durumunda ucun yüzey üzerindeki hareketi, yüzeyin topografisi hakkında bilgi verecektir (Şekil 2.11) [32].

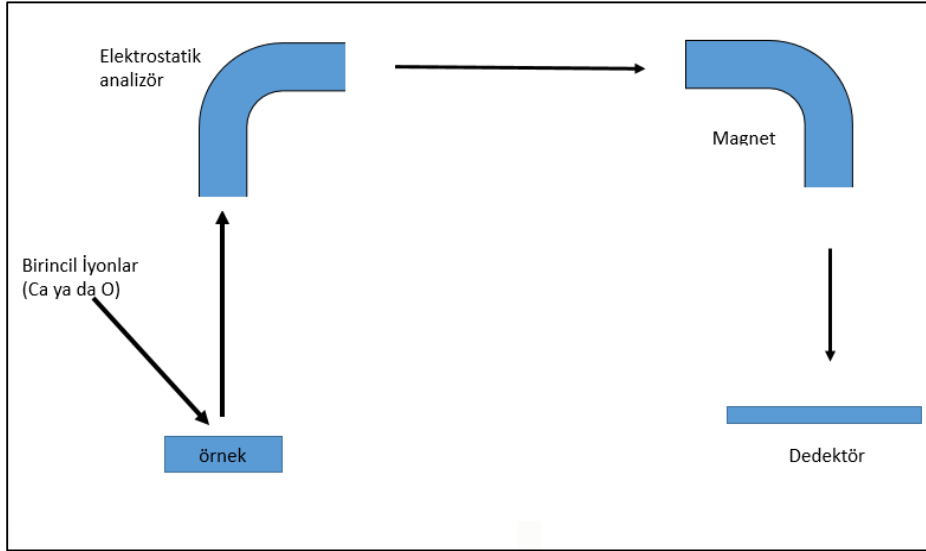


Şekil 2.11. AFM sisteminin şematik gösterimi

2.8. İkincil İyon Kütle Spektroskopi (SIMS) Yöntemi

İkincil İyon Kütle Spektrometresi (SIMS); katkılanmış malzemelerde katkı ve kirlilik konsantrasyonunu, malzemenin kalınlığının bir fonksiyonu olarak incelemeye yarayan sistemdir. Bu tez çalışmasında SIMS yöntemi, farklı seviyelerde karbon katkılanmış GaN epitaksiyel yapılarındaki karbon miktarlarının belirlenmesi için kullanılmıştır.

SIMS yönteminde malzeme bir iyon demeti ile bombardıman edilir. Şekil 2.12'de gösterildiği gibi, birincil iyon demetinin örnek ile etkileşimi sonucu oluşan ikincil iyonlar, manyetik alan yardımı ile bir kütle analizöründe toplanır ve karakterizasyon tamamlanmış olur. Sistem vakum ortamında çalışmaktadır ve katı malzemeler için birkaç mikrometre malzeme derinliğine kadar karakterizasyon yapılabilir [33].



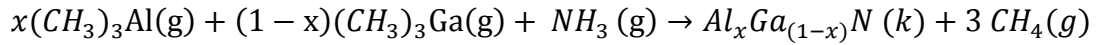
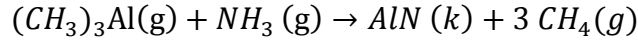
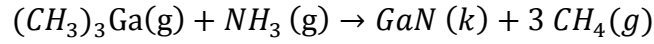
Şekil 2.12. İkincil İyon Kütle Spektrometresinin (SIMS) şematik gösterimi

3. DENEYSEL YÖNTEMLER

3.1. Üretim Sistemleri

3.1.1. Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD) Sistemi

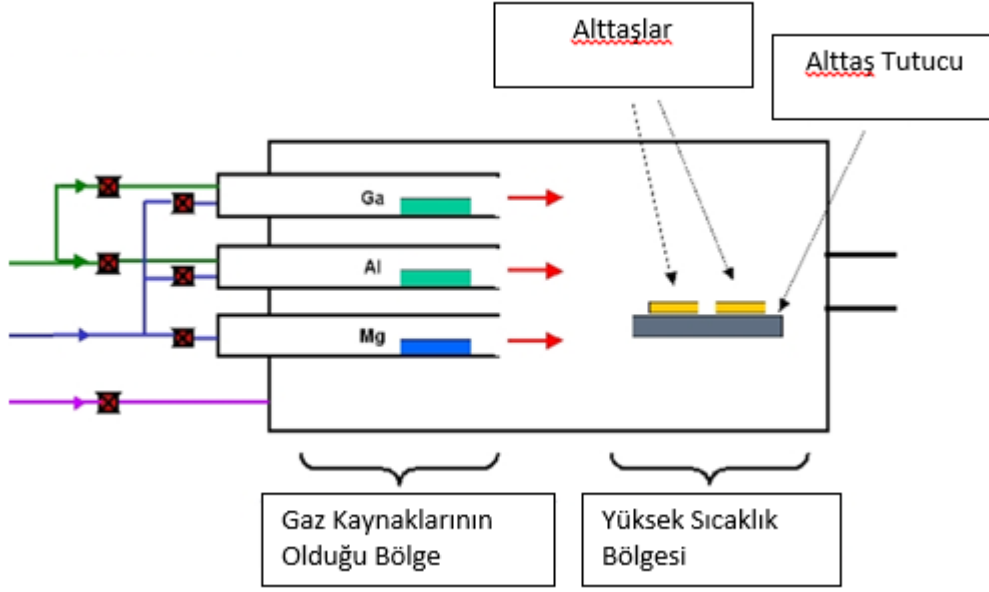
MOCVD yönteminde; yarıiletken bir alttaş üzerine gaz fazındaki kaynak kullanılarak, sisteme gönderilen gazların reaksiyonu sonucu oluşan ürünün alttaş yüzeyinde büyütülmesi sağlanır. Bu tez çalışmasında; AlN, AlGaN ya da GaN yapılarının büyütülmesi için yüksek saflığa sahip N₂ ya da H₂ taşıyıcı gazları kullanılarak, amonyak (NH₃), trimetilgalyum (TMGa) ve trimetilalüminyum (TMAI) gazları ile kimyasal bir reaksiyon oluşturulur. MOCVD sistemi ile büyütme işleminde büyütme kontrolü mükemmelere yakın olmakla birlikte, zamandan kazanç sağlayacak düzeyde hızlı büyütme işlemleri yapılabilmektedir. Sistemde oluşan reaksiyon zinciri aşağıda ifade edilmiştir:



Şekil 3.1. MOCVD Sisteminin Görüntüsü

Şekil 3.1'de gösterilen sistem, NANOTAM'da bu tez çalışması süresince kullanılan AIXTRON 200/4 RF S MOCVD sistemidir. Şekil 3.2'de sistemin şematik görünümü verilmiştir. Şekil 3.1'de görülen alttaş tutucunun bulunduğu bölgede sıcaklık daha

yüksektir. Isıtılmış olan alttaş üzerine gönderilen gaz molekülleri arasındaki bağlar koparak alttaş üzerinde kristalleşme başlar ve büyütme bu şekilde gerçekleşir.



Şekil 3.2. MOCVD Tekniğinin Şematik Gösterimi

3.1.2. Kuru Aşındırma Sistemi

Kuru aşındırma sisteminde (Şekil 3.3); RF kaynağı, elektrotlar, plazma ortamında reaktif olacak gazlar, aşındırma için uygun reaktör vakumu vb. birimler bulunmaktadır. Aşındırma işlemi izolasyon amacıyla yapılmaktadır. Kuru aşındırma sistemi, büyütülen GaN epitaksiyel yapısı kullanılarak üretilmesi planlanan transistörün fabrikasyonunda birbirinden izole olmuş adacıklar (mesa) oluşturmak amacıyla yapılır.

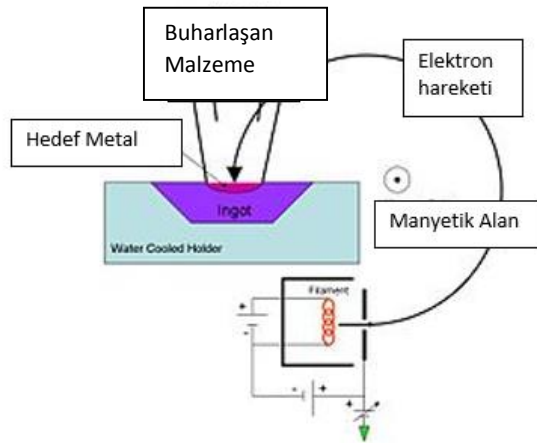
Sistem uygun vakum değerine ulaşıldığı zaman, aşındırma amacına uygun olarak seçilmiş gazlar reaktörün içerisine verilir. Kuru aşındırma sisteminin belirleyici bir parametresi olan RF sinyali uygulandığında, gazlardan aşındırıcı iyonlar oluşturur ve elektrotlarla sağlanan yönlendirme sonucunda aşındırma işlemi yapılır. Bu tez çalışmasında kullanılan kuru aşındırma sistemi; Sentech ICP RIE (İndüklenmiş Çiftlenmiş Plazma, Reaktif İyon Aşındırma) SI500 sistemidir ve Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Kuru Aşındırma Sistemi (ICP RIE)

3.1.3. Kaplama Sistemi

Kaplama (metalizasyon işlemi) işlemi Şekil 3.4'te şematize edildiği gibi, ısıtılan bir filamandan kopan elektronların manyetik alanla yönlendirilerek hedef malzemenin üzerine düşürülmesi ve hedef malzemenin buharlaştırılması ile sağlanır. Vakum ortamında gerçekleştirilen bu işlem, buharlaşan malzemenin altına kaplanmasıyla son bulur.

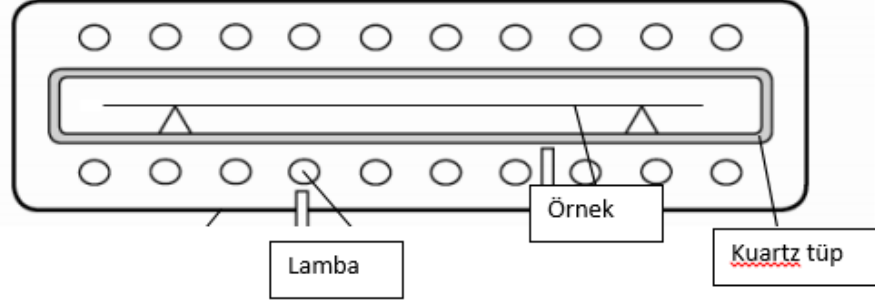


Şekil 3.4. Elektron demeti ile kaplama sisteminin şematik gösterimi

3.1.4. Tavlama Sistemi

Yüksek Elektron Mobiliteli Transistör (HEMT) üretimi sırasında, kaplanmış olan metallere omik özellik kazandırmak amacıyla yapılan yüksek sıcaklık işlemi için

kullanılan sistemdir. Bu işlem sırasında kaplama metalleri birbiriyle alaşım oluşturarak 2DEG bölgesine nüfuz (difüz) ederler.



Şekil 3.5. Hızlı Termal Proses Sistemi (RTP – Rapid Termal Prosesing) Şematik Gösterimi

Şekil 3.5'te şematize edilmiş olan RTP sisteminin yüksek sıcaklıklara çıkması, halojen lambalar ve %5 H₂ ve %95 N₂ içeren, forming isimli karışım gazı ile sağlanır. Bu tez çalışmasında tavlama işlemleri, NANOTAM'da bulunan SSI – Surface Science Integration sistemi kullanılarak yapılmıştır.

3.2. Tez Çalışmasında Kullanılan GaN Örneklerinin Üretimi

3.2.1. GaN Örneklerini Hazırlama

Bu tez çalışmasında; farklı reaktör basınçları kullanılarak farklı oranlarda karbon miktarı içeren GaN epitaksiyel yapılar büyütülmüştür. Tez süresince; işlem görmemiş GaN örnekleri ve fabrikasyon adımlarının GaN örneklerine olan etkisi, ESR yöntemi ile incelenmiştir. Fabrikasyon adımlarının GaN örneklerine olan etkisinin incelenmesinde, fabrikasyon akışında ilk olarak omik adım kaplama işlemi, sonrasında tavlama işlemi ve son olarak aşındırma işlemleri gerçekleştirilmiş ve her basamakta ESR incelemeleri yapılmıştır. Bu incelemeler, farklı miktarlarda karbon katkılanmış 3 farklı GaN (GaN:C₁, GaN:C₂, GaN:C₃) epitaksiyel yapıları için tekrarlanmıştır.

GaN epitaksiyel yapılarında katkı malzemesi olarak karbonun seçilme nedenleri, karbonun Mg, Fe gibi katkı malzemeleri ile kıyaslandığında reaktör içerisinde kalıcı kirlilik bırakmaması, diğer malzemelere göre yüksek kararlılık göstermesi ve uygun atomik yarıçapa sahip olmasıdır. Üretilecek olan GaN tabanlı transistörün, GaN

tampon tabakasının yüksek dirençli bir yapıya sahip olması karbon katkılanarak sağlanır [8-12].

3.2.2. MOCVD Yöntemi ile GaN Örneklerinin Büyütülmesi

MOCVD sistemi, bir alttaş üzerine, incelenecek olan epitaksiyel katmanı büyütme için kullanılan sistemdir. Şekil 3.1'de gösterilen sistemde eldivenli kutu (glove box) kısmından alttaş yerleştirilmiştir. Ardından örnek reaktör kısmına, robotik kolla gönderilmiştir.

Bu tez çalışmasında; safir alttaş üzerine Şekil 3.6'da gösterilen epitaksiyel yapılar büyütülmüştür. Büyütme işlemi, GaN epitaksiyel yapısının farklı oranlarda karbon katkılanmasını sağlayabilmek için farklı büyütme basınç değerlerinde yapılmıştır. Uygulanan basınç değerleri ile GaN içerisinde katkılanan karbon miktarının ters orantılı olduğu bilinmektedir. Büyütme basınç değerleri sırasıyla 200 mbar, 100 mbar ve 50 mbar'lık basınç seviyelerinde yapılmıştır. Büyütme işlemi tamamlandıktan sonra 2 inçlik ya da 3 inçlik (1 inç = 2,54 mm) boyutlarda alttaşlarda büyütülen örnek, reaktörden yine eldivenli kutuya geçirildikten sonra çıkarılmıştır. Büyütülen örneğin aniden atmosfere çıkarılması, örneğin yüzeyinde kararsız oksit tabakası oluşmasına sebep olmaktadır.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.6. Farklı alttaşlar üzerine büyütülen epitaksiyel yapılar (a) SiC alttaş, (b) Si alttaş, (c) farklı yapı, (d) safir alttaş

Büyütülen örneklerin ESR çalışmalarında incelenebilmesi için (ESR kapiler tüplerinin iç çapı ~ 2 mm), hazırlanan örnekler 12x2 mm²lik boyutlarda kesilmiştir. Örneklerin kesme işleminde, örnek yüzeyine AZ5214 isimli foto direnç yayılarak; örneğin kesim sırasında kırılması ve çatlaması engellenmiştir. Kesme işlemi için Şekil 3.7de gösterilen DAD3220 (Disco Automatic Dicing) Sistemi kullanılmıştır.



Şekil 3.7. DAD3220 (Disco Automatic Dicing) Sistemi

Örneklerin kesme işlemi tamamlandıktan sonra kesilen örnekler, üzerindeki foto direncin temizlenmesi için öncelikle *aseton*, daha sonra ise *alkol* ile yıkanmıştır. Temizlenen örneklerin kurutma işlemi azot gazı ile yapılmıştır.

3.2.3. Metalizasyon İşlemi

Tez çalışmasında hazırlanan örnekler, elektron demeti kullanılarak 4 farklı metal ile kaplanmıştır. Kaplama işlemi Oerlikon Leybold Vacuum Univex 350 sistemi kullanılarak, sırasıyla 12 nm Ti, 120 nm Al, 35 nm Ni, 50 nm Au kullanılarak kaplanmıştır.

3.2.4. Tavlama İşlemi

Tavlama adımı metal kaplama adımının ardından yapılarak, örneğe omik özellik kazandırmak amacıyla yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında; farklı tavlama sürelerinin farklı karbon katkılı örneklerle etkisi incelenmiştir. Bu amaçla örnekler 850 °C olan tavlama sıcaklığında 15 saniye, 30 saniye ve 60 saniye sürelerince

tavlanmıştır. Bu işlemler, karbon katkı seviyesi farklı olan 3 örnek grubu için de tekrarlanmıştır.

3.2.5. Kuru Aşındırma İşlemi

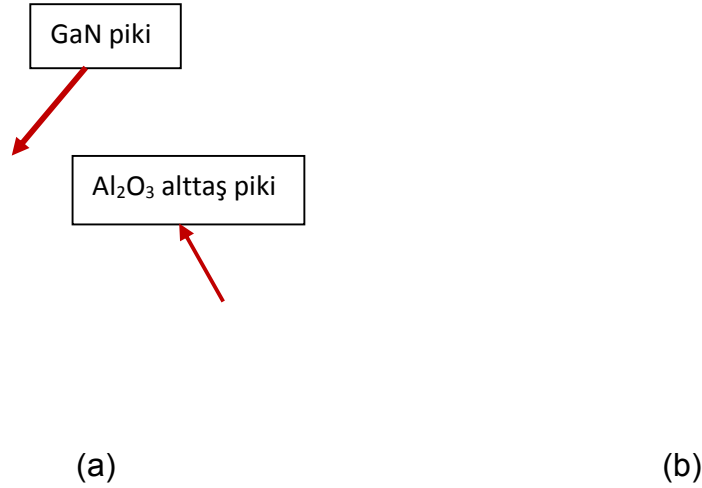
Kuru aşındırma işlemi SENTECH ICP RIE SI 500 sistemi kullanılarak örnek hazırlama işlemi NANOTAM' da yapılmıştır. Tez çalışması kapsamında hazırlanan farklı karbon katkılı örnekler, BCl_3 ve Cl_2 gazları ile yapılan farklı RF gücü değerlerinde aşındırılmış ve ESR ile incelemeleri yapılmıştır. Standart fabrikasyon işleminde 50 W olan RF gücünün farklı karbon katkısı içeren örnekler etkisi incelenmiştir. Ayrıca farklı RF güç değerlerinin (30 W, 50 W, 100 W) örnekler üzerindeki etkileri de araştırılmıştır.

4. DENEYSEL BULGULAR

4.1. X-Işınları Kırınım (XRD) Çalışmaları

Bu tez çalışmasında, X-Işınları Kırınım (XRD) analiz tekniği, MOCVD yöntemi ile büyütülen farklı oranlarda karbon katkılanmış GaN örneklerinin kristal yapılarını incelemek için kullanılmıştır. Bu amaçla kullanılan X-ışını cihazı, RIGAKU-Smartlab X-ışını kırınım metresidir.

Bu bağlamda yapılan çalışmalar işlem görmemiş GaN örnekleri için yürütülmüştür. İşlem görmemiş GaN örnekleri, daha önceki kesimlerde açıklanan MOCVD yöntemi ile büyütülmüş ancak herhangi bir tavlama ve/veya aşındırma işlemlerine tabii tutulmamış örneklerdir. Her farklı karbon katkılı örnek için yapılan XRD analizinde, bu kesimde alttaş olarak kullanılan safir ve GaN örneklerine ait bulgular Şekil 4.1'de verilmiştir. Farklı karbon oranlarında katkılanan GaN örnekleri, GaN:C₁, GaN:C₂ ve GaN:C₃ olarak isimlendirilmiştir. Bu isimlendirmede GaN:C₁ en düşük oranda karbon katkılanmış GaN örneğini, GaN:C₂ orta düzeyde karbon katkılanmış GaN örneğini ve GaN:C₃ ise en yüksek oranda karbon katkılanmış GaN örneğini temsil etmektedir.



Şekil 4.1. Farklı oranlarda karbon katkılı işlem görmemiş GaN örnekleri için XRD bulguları a) gösterimi b) GaN:C₁, GaN:C₂, GaN:C₃ bir arada verilen sonuç

Şekil 4.1.a.'da XRD sonuçlarının gösterimi ile ilgili açıklama gösterilmiştir. GaN:C₁, GaN:C₂, GaN:C₃ örneklerinin XRD sonuçları incelendiğinde, spektrumlarında daha küçük yansıma açısında gözlenen (sol taraf) yüksek şiddetli pikler karbon katkılı

GaN örneğine aittir. Spektrumun büyük yansıma açısında (sağ taraf) gözlenen XRD piki ise, bu kesimde büyütülen örneklerin alttaşı olarak kullanılan Al_2O_3 (Safir) alttaşına aittir [47,48]. Görüldüğü gibi, GaN yapısı içerisine katılan karbon miktarı arttıkça, GaN örneğine ait XRD piklerin sağa doğru kaymakta, alttaşa ait olan XRD piki ise sabit kalmaktadır. Bu sonuç literatür ile uyum içindedir [49]. Bulgular değerlendirildiğinde, spektrumdaki kaymanın GaN:C₃ örneğinde belirgin bir şekilde görüldüğü, GaN:C₁ ve GaN:C₂ örnekleri için elde edilen XRD piklere ait yansıma açılarının ise değişmediği görülmektedir.

Yapı içerisine karbon katılanması, katılan örneklerin kristal örgüsü içerisinde istenmeyen kusurlara ve yapısal bozukluklara sebep olabilir. XRD çalışmasında GaN örneğine ait piklerin kayması, yüksek oranda karbon katılanması sonucunda katılan malzemenin kristal yapısında değişikliklere neden olduğunun göstergesidir. Bu yapıya katılanmış olan karbon miktarlarının kristal yapıyı eşit derecede etkilediği anlamına gelebilir. GaN:C₁ ve GaN:C₂ örnekleri karşılaştırıldığında ise, C₂ konsantrasyonunun yapıda değişikliğe neden olacak bir miktarda olmadığı görülmektedir.

4.2. Elektron Spin Rezonans (ESR) Çalışmaları

Üstün özellikleri nedeniyle teknolojiye sıklıkla kullanılan GaN örneğinde değişik etki mekanizmalarıyla oluşabilecek hasar ve kusur merkezlerinin tanımlanması, GaN örneğinin kullanıldığı aygıt verimi için bir öngörü oluşturması açısından oldukça önemlidir. GaN içerisine oluşabilecek hasar ve kusur merkezlerinin analizinde kullanılacak yöntemlerden birisi ESR tekniğidir. Literatürde ESR ve diğer Manyetik Rezonans teknikleri kullanılarak GaN epitaksiyel yapısı içerisindeki hasar türlerinin araştırıldığı çalışmalar vardır. [5-6,12-14, 35, 40, 41, 51-52].

Bu tez çalışmasında, NANOTAM'da büyütülen GaN ince filmlerinin manyetik özelliklerinin incelenmesi, böylece üretim esnasında kullanılan parametrelere bağlı olarak GaN yapısı içerisinde oluşabilecek hasar/kusur merkezleri hakkında bilgi edinilmesi amaçlanmıştır. Bu şekilde aygıt performansı için bir öngörü oluşturularak, optimum parametrelerle ilgili fikir yürütülebilmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda, büyütülen GaN örneklerinin manyetik özelliklerinin irdelenmesinde ESR tekniği kullanılmış ve elde edilen bulgular, XRD, PL, AFM ve SIMS tamamlayıcı sonuçları ışığında değerlendirilmiştir.

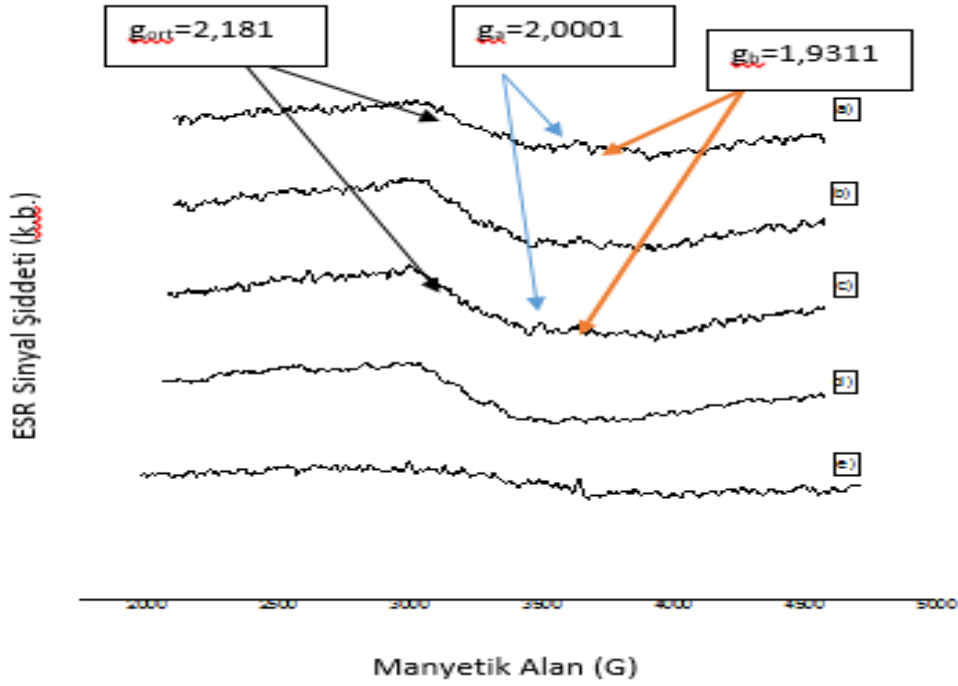
Bu çalışmada; GaN örneklerinin incelenmesi istenilen özelliklerinden birisi, farklı reaktör basıncı değerlerinde (200 mbar, 100 mbar, 50 mbar) büyütülerek farklı oranlarda karbon katkılanan GaN örneklerinde oluşan kusur merkezlerinin araştırılmasıdır. Yapıya katkılanan karbon miktarı artışının yüksek direnç sağlayarak, üretilen transistörlerdeki akım kaçaklarını azalttığı bilinmektedir [7-11, 34].

Rutin GaN epitaksiyel yapısının kullanıldığı transistör üretiminde öncelikli olarak Ti/Al/Ni/Au kaplama işlemi yapılır. Ardından kaplanmış olan metallere omik özellik kazandırabilmek için örnekler 850 °C sıcaklıkta, 30 saniye süreyle tavllanır. Aşındırma işlemi ise 50 W RF gücünde 1 dakika süreyle gerçekleştirilir. Bu tezin amaçlarından bir diğeri ise, transistör üretiminde izlenen ve yukarıda açıklanan rutin adımlardan farklı olarak, fabrikasyon işleminde üretim standartlarının dışına çıkmadan, farklı parametrelerin kullanılması ve bu şekilde üretilen örneklerin kusur, hasar vb. özelliklerinin araştırılmasıdır. Bu bağlamda; üretilen GaN örneğinin işlem görmemiş (kaplama, tavlama ve aşındırma işlemleri uygulanmamış), sonraki adımlarda ise transistör fabrikasyonunda gerekli olan metal kaplama, tavlama ve aşındırma işlemlerine maruz kalmış örneklerindeki parametre değişimlerinin yapıya etkisi ESR yöntemi ile incelenmiştir.

Bu amaçla, işlem görmemiş bazı GaN örneklerinin ESR çalışmalarında üç farklı oranda karbon katkılanmış (GaN:C₁, GaN:C₂ ve GaN:C₃) örnekler kullanılarak, metal kaplanıp, tavlama süresi ve aşındırma işleminde kullanılan RF gücü gibi fabrikasyon parametreleri değiştirilerek incelemeler yapılmıştır. Bu incelemede kullanılan GaN örnekleri; yüksek karbon katkısı (GaN:C₃), düşük karbon katkısı (GaN:C₁) ve orta karbon katkısı (GaN:C₂) içerecek şekilde sınıflandırılmıştır.

4.2.1. İşlem Görmemiş GaN İnce Filmlerinin ESR Çalışmaları

Farklı alttaşlar kullanılarak büyütülmüş GaN ince filmleri için kaydedilen ESR spektrumları Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Farklı alttaş üzerine büyütülmüş ya da farklı katkılanmış GaN örneklerin ESR spektrumları (a) Safir alttaş- GaN:C₃ (b) Safir alttaş- üzeri GaN:C₂ (c) Safir alttaş- GaN:C₁, (d) Safir alttaş- Mg:GaN (e) SiC alttaş- GaN

Üretilen işlem görmemiş GaN örneklerinin kaydedilen ESR spektrumları irdelendiğinde, oldukça geniş bir manyetik alana yayılmış (~ 2000 G), g_{ort} değeri 2,181 ve tepeden tepeye çizgi genişliği ~560 G olan ESR sinyali olduğu görülmektedir. Ayrıca bu örneklerin ESR spektrumunda, *a* ve *b* olarak isimlendirilen, sinyal şiddetleri oldukça düşük, gürültüden zorlukla ayırt edilebilen iki adet rezonans sinyali daha görülmektedir. Bu sinyaller, özellikle mikrodalga doyum çalışmalarında (Şekil 4.4) daha net olarak gözlenmektedir. Gözlenen *a* ve *b* sinyallerin *g* değerleri sırasıyla $g_a = 2,0001$ ve $g_b = 1,9311$ olarak belirlenmiştir ve bu sinyallerin tepeden tepeye sinyal genişliği ~27 G olarak hesaplanmıştır.

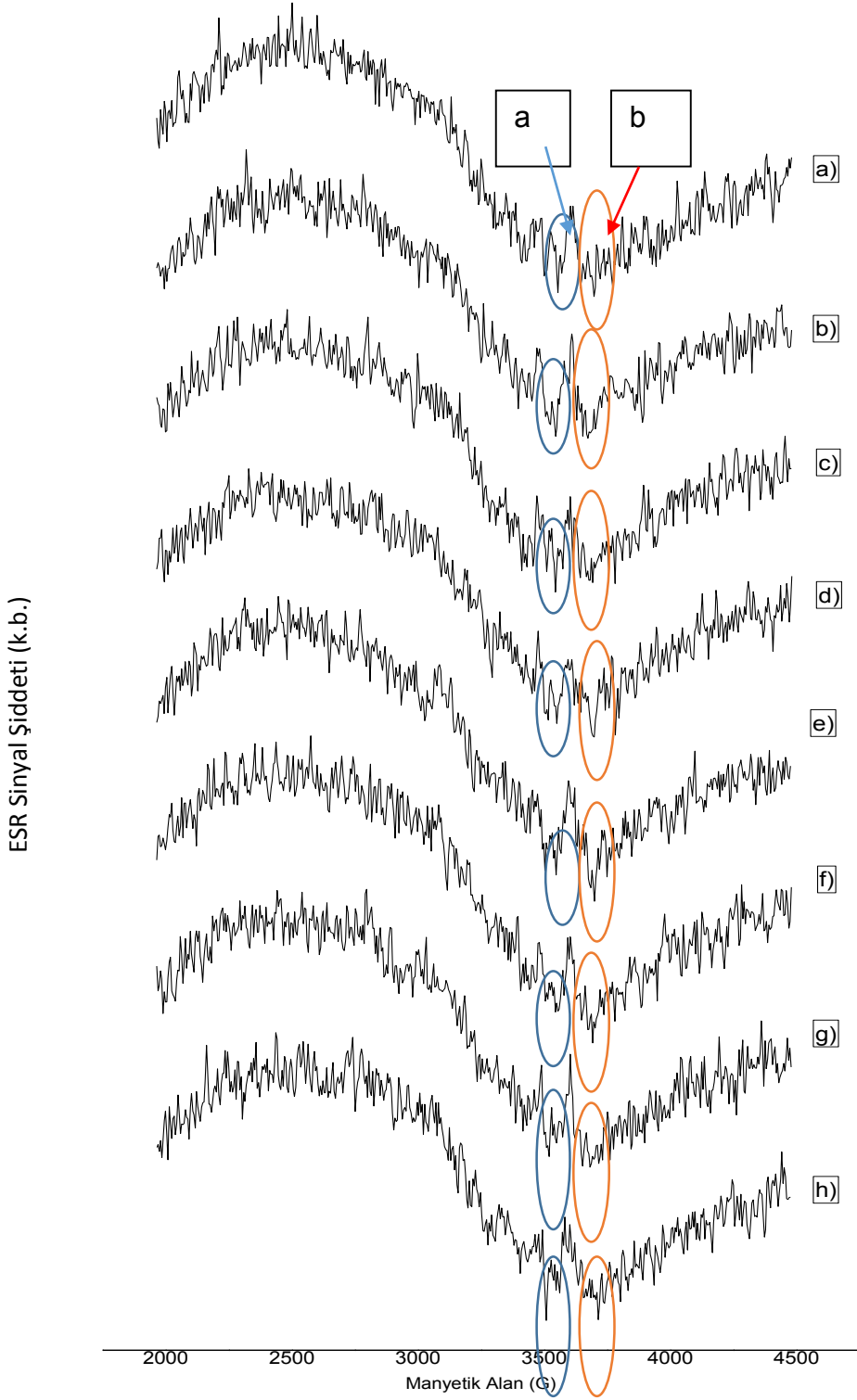
Büyütülen işlem görmemiş farklı oranlarda karbon katkılanmış GaN ince filmleri için belirlenen $g_{ort} = 2.181$ değerine sahip geniş rezonans sinyalinin, GaN'ın yapısı içerisindeki safsızlıklar ve/veya kusur merkezleri tarafından oluşturulduğu düşünülmektedir [42-45]. Bu safsızlık türleri için genel bir tanımlama vermek zor olsa da, yapıya girişlerinin kontrol edilemediği düşünülen bu safsızlık miktarlarının yaklaşık $10^{15} - 10^{16}$ spin/cm³ olduğu bilinmektedir [14]. GaN örneğine ait ESR spektrumunu büyük ölçüde oluşturan bu safsızlık türlerinin kaynağı; azot ve/veya galyum boşlukları, azot ve/veya galyum hasar merkezleri, oksijen boşlukları, yapının

yüzeyel bölgesine yakın verici merkezler, vb. hasar, tuzak, renk merkezleri olabilir ve bu merkezlerin varlığı büyük ölçüde örneklerin hazırlanma koşullarına da bağlıdır [41]. GaN epitaksiyel yapısı kullanılarak üretilen aygıtların performansının yükseltilebilmesi için GaN yapısında bulunan hasar merkez tür ve miktarının belirlenmesi konusu oldukça önemlidir ve bu bağlamda birçok çalışmanın da yapılma gerekliliği vardır [12,42-45].

GaN örnekleri için kaydedilen ESR spektrumlarında a ve b olarak tanımlanan ESR rezonans sinyallerinin ise sırasıyla, serbest elektrona yakın bölgede g değerine sahip *karbon ve derin bölge tuzak/hasarlar merkezlerine* ait oldukları düşünülmektedir. Elde edilen bulgular, GaN örneği ile ilgili literatürde yapılan bazı ESR çalışmaları ile uyum içindedir [14,35, 40-41].

4.2.2. İşlem Görmemiş GaN İnce Filmlerinin Kavitedeki Yönelimine Bağlı ESR Çalışmaları

İşlem görmemiş GaN ince filmlerinin incelendiği ESR çalışmalarında, ESR spektrometresindeki kaviteye yerleştirilen örneklerin kavitedeki yönelimlerine bağlı olarak ESR spektrumlarının ve spektral parametrelerinin nasıl değiştiği de incelenmiştir (*Şekil 4.3*). Kavite içerisinde farklı yönelimlerde yerleştirilmiş GaN ince filmlerinin ESR spektrumları incelendiğinde, örneklerin kavitedeki yönelimlerinin ESR spektrumlarını değiştirmedeği görülmüştür. Bu da malzemenin g faktörünün yönelimden bağımsız (izotropik) olduğu anlamına gelir.

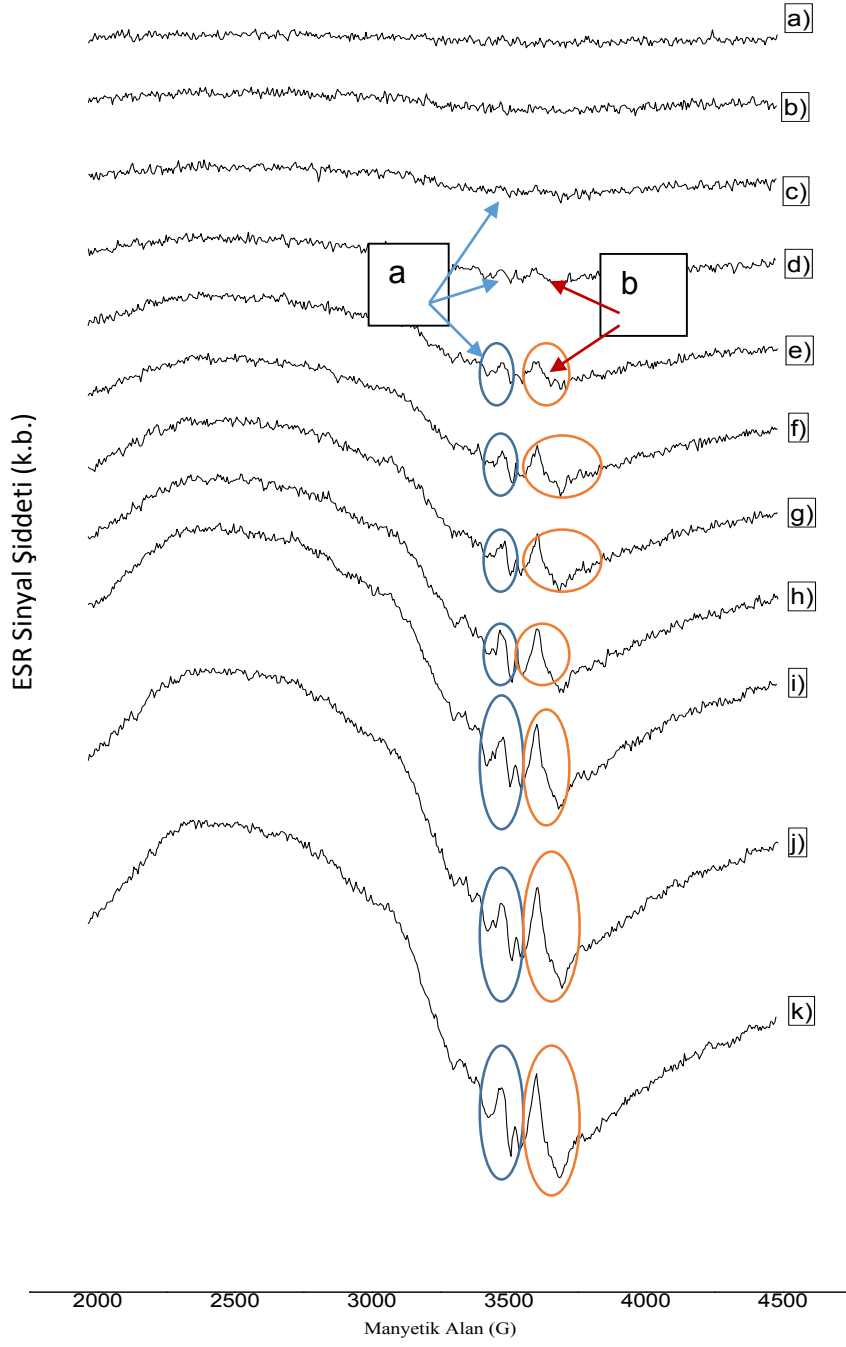


Şekil 4.3. İşlem görmemiş GaN örneklerinin farklı kavite yönelimleri (açı) için kaydedilmiş ESR spektrumları (a) 0°, (b) 10°, (c) 20°, (d) 30°, (e) 90°, (f) 180°, (g) 270°, (h) 360°

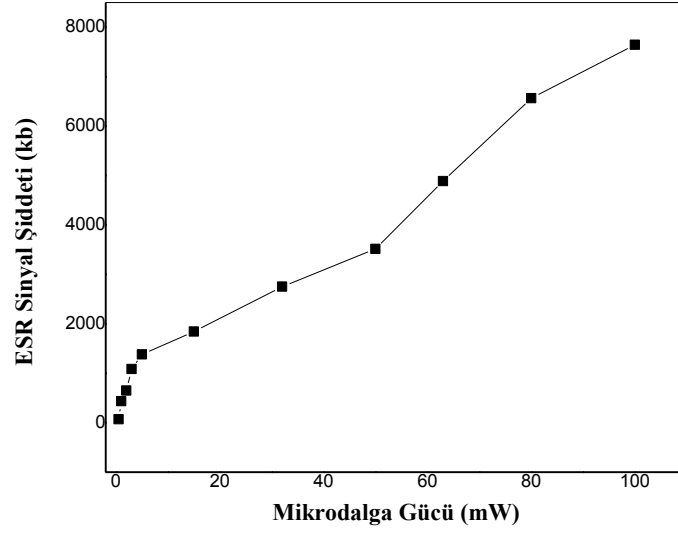
4.2.3. İşlem görmemiş GaN Örnekleri İçin Modülasyon Genliği ve Mikrodalga Çalışmaları

Büyütülen GaN örneklerinin ESR çalışmaları için kullanılacak optimum deney koşullarını belirlemek için, örneklerin modülasyon genliği ve mikrodalga gücüne bağımlılıkları araştırılmıştır. Böylelikle spektrometre çalışma koşulları için, modülasyon genliğinin 1 G ve mikrodalga gücünün 2 mW olmasına karar verilmiştir. Şekil 4.4 ve Şekil 4.6'da gösterilmiş olduğu gibi, GaN örneğine katılan karbona ve daha derin bölgedeki tuzaklardan kaynaklandığına inanılan a ve b rezonans pikleri, yüksek modülasyon genliği ve mikrodalga güçlerinde daha belirgin olarak gözlenmektedir.

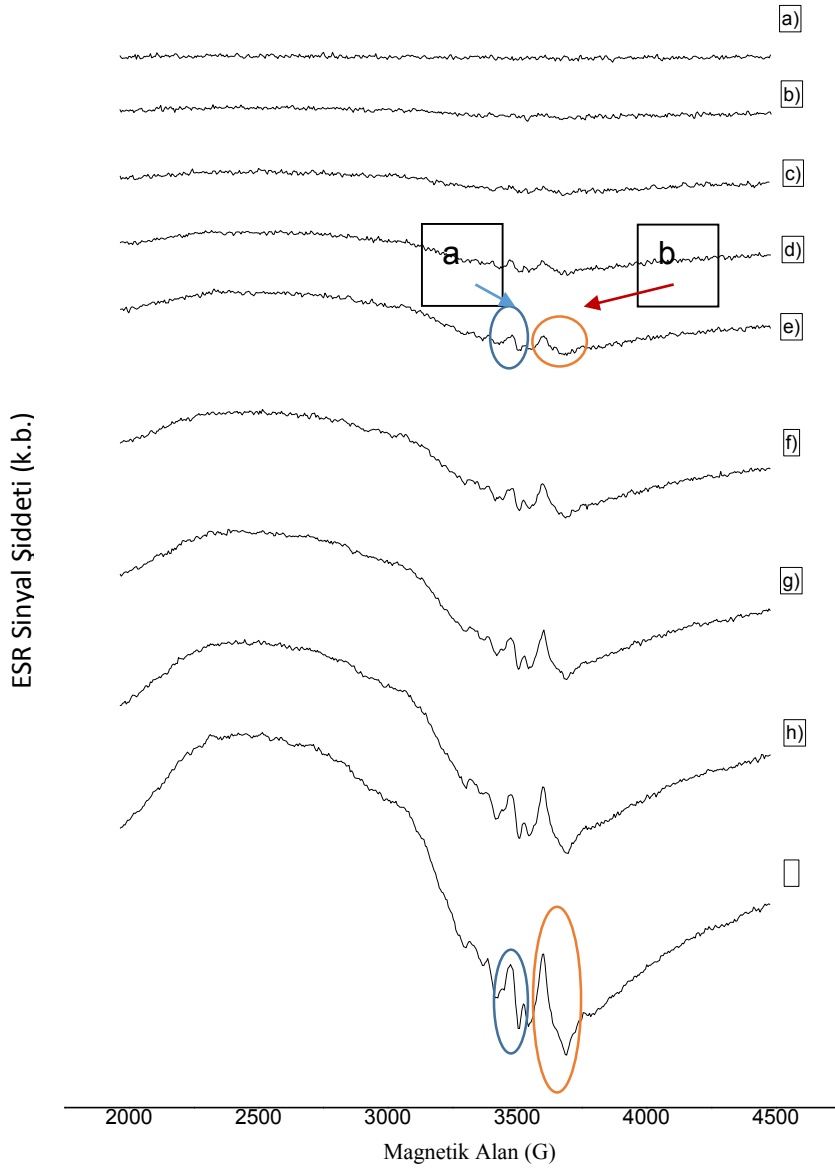
Şekil 4.5 ve Şekil 4.7'de, işlem görmemiş GaN ince filmlerinin tepeden tepeye ESR sinyal şiddetlerinin farklı mikrodalga gücü ve modülasyon genliklerindeki değişimleri verilmiştir.



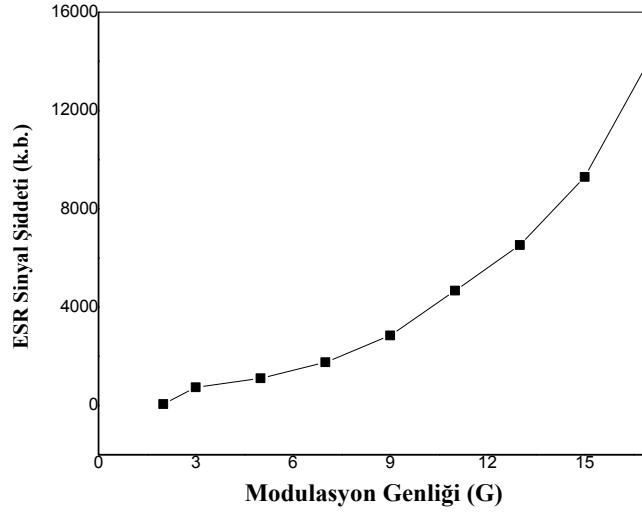
Şekil 4.4. İşlem görmemiş GaN ince filmlerinin değişik mikrodalga güçlerinde kaydedilen ESR spektrumları (a) 0,5 mW; (b) 1 mW; (c) 2 mW; (d) 3 mW; (e) 5 mW; (f) 15 mW; (g) 32 mW; (h) 50 mW; (i) 63 mW; (j) 80 mW; (k) 100 mW



Şekil 4.5. İşlem görmemiş GaN ince filmlerinin tepeden tepeye ESR sinyal şiddetlerinin farklı mikrodalga gücündeki değişimleri



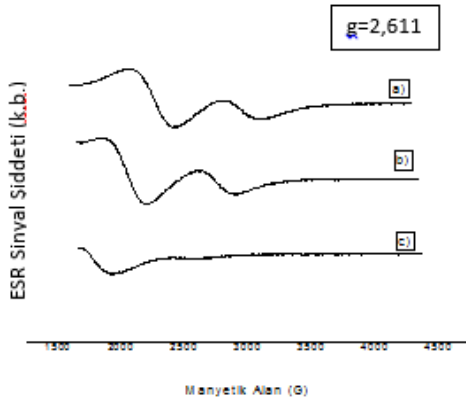
Şekil 4.6. İşlem görmemiş GaN ince filmlerinin ESR spektrumlarının değişik modülasyon genlik değerlerindeki ESR spektrumları (a) 2 G; (b) 3 G; (c) 5 G; (d) 7 G; (e) 9 G; (f) 11 G; (g) 13 G; (h) 15 G; (i) 17 G



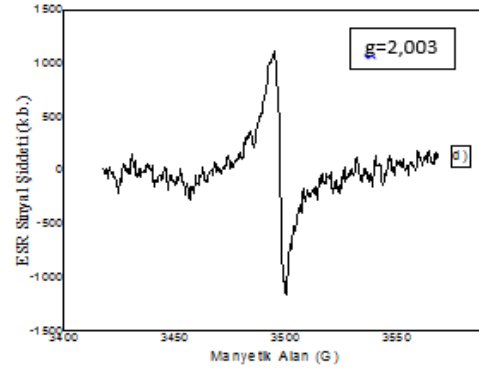
Şekil 4.7. Hazırlanan işlem görmemiş GaN ince filmlerinin ESR sinyal Şiddetinin değişik modulasyon genliği değerlerindeki ESR sinyal Şiddetlerinin değişimleri.

4.2.4. Farklı Metallerle Kaplanan GaN İnce Filmlerinin ESR alıŐmaları

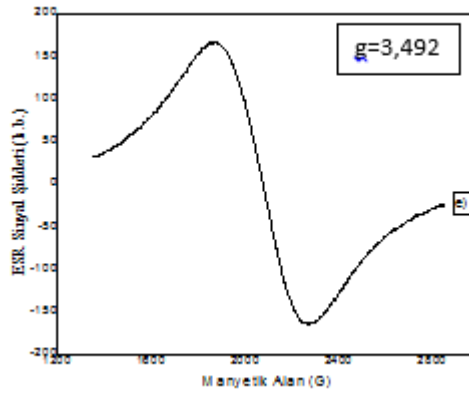
Metal kaplanan örneklerin ESR çalışmalarında, fabrikasyona uygun kaplama kalınlıkları seçilerek kaplama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu kaplama işlemlerinde elektron demeti buharlaŐtırma sistemi kullanılmıştır. Bu kapsamda; Ni, Cu ve dörtlü metal kaplama işlemleri yapılmıştır ve çeŐitli metallerle kaplanmış GaN  rnekleri için kaydedilen ESR spektrumları Şekil 4.8'de verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.8. Farklı metal kaplanmış GaN örneklerinin ESR spektrumları. **a)** Dörtlü metal kaplanmış GaN:C₃, GaN:C₂, GaN:C₁ **b)** Cu kaplanmış GaN **c)** Ni kaplanmış GaN

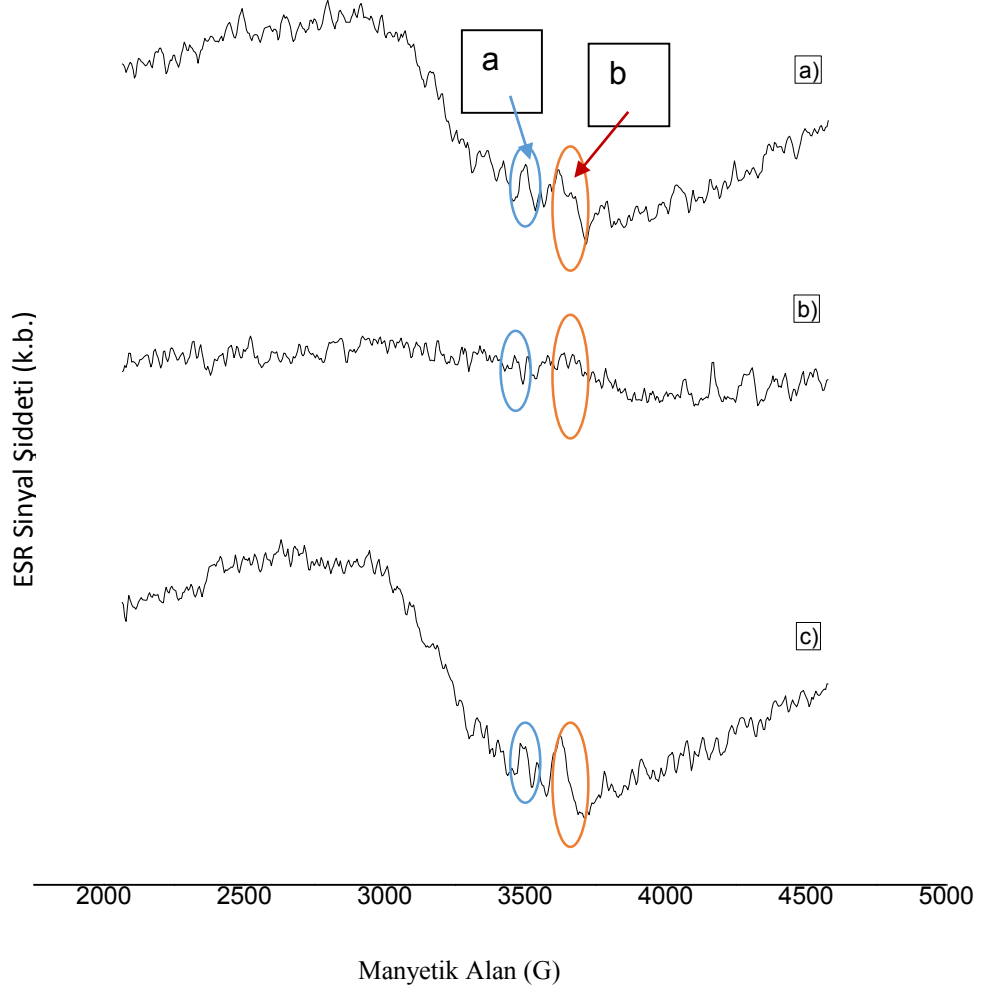
4.2.5. Üretilen GaN Örneklerinde Tavlama (Isıl İşlem) Çalışmaları

Tavlama işlemi, malzeme yüzeyini yapısal yüzeysel olarak değiştirmektedir [14].

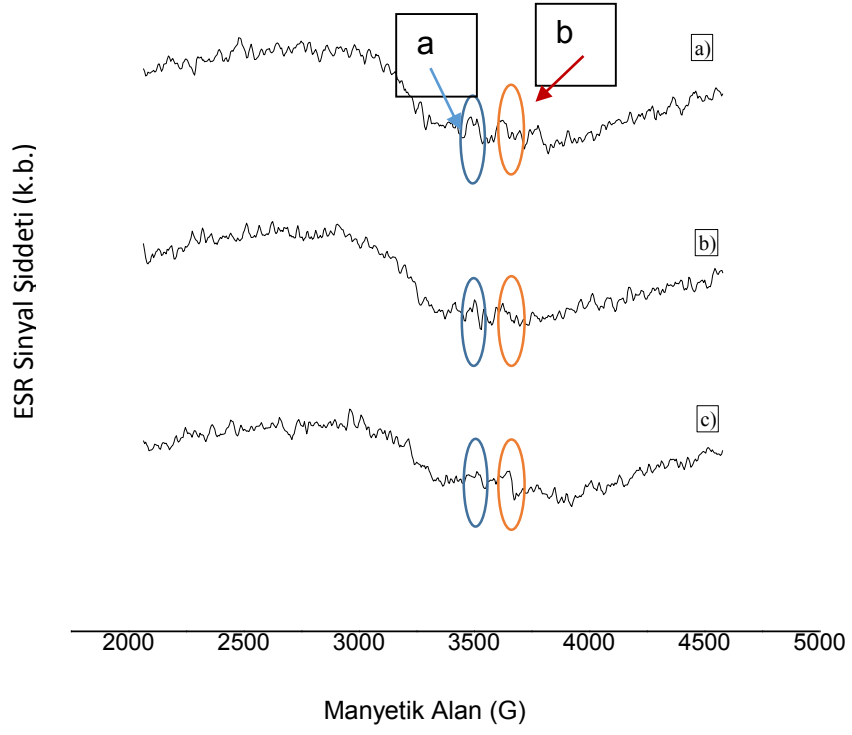
Tavlama işleminin moleküler düzeydeki hareketliliği arttıracığı ve böylece paramanyetik kusur merkezlerinin sayısında bir azalma gerçekleşeceği düşünülmektedir.

GaN örneklerin tavlama çalışmalarında, Nanotam'da bulunan 200-1200 °C (± 2 °C) çalışma aralığına sahip *SSI/Surface Science Integration* sistemi kullanılmıştır. Farklı oranlarda karbon katkılanmış GaN örneklerinin tavlama çalışmaları 850°C'de, 15 s, 30 s ve 60 s tavlama sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular *Şekil 4.9*, *Şekil 4.10* ve *Şekil 4.11*'de verilmiştir.

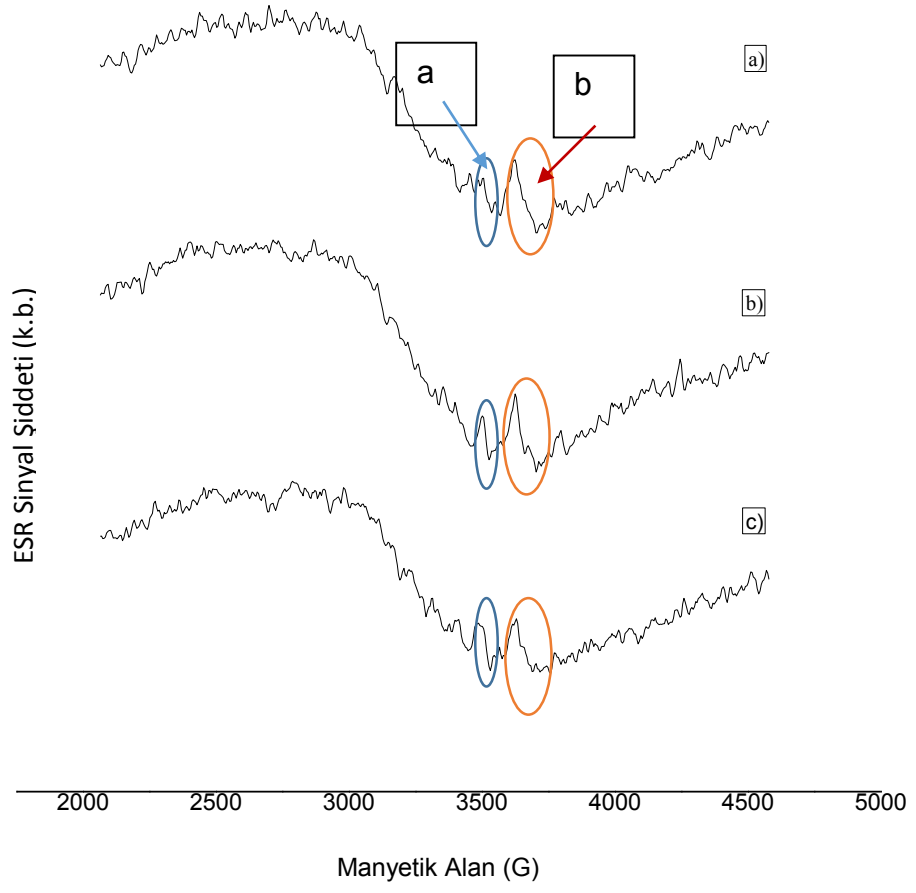
Tavlama sıcaklığı olan 850 °C’da farklı sürelerde bekletilen GaN örneklerine ait ESR spektrum alanlarının tavlama süresine bağlı değişimleri Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.9. GaN:C₃örneği için 850°C’ de tavlama işlemi sonrasında kaydedilen ESR sinyalleri (a) 15 s, (b) 30 s, (c) 60 s.



Şekil 4.10. GaN:C₂ örneği için 850°C' de tavlama işlemi sonrasında kaydedilen ESR sinyalleri (a) 15 s, (b) 30 s, (c) 60 s.



Şekil 4.11. GaN:C₁ örneği için 850°C' de tavlama işlemi sonrasında kaydedilen ESR sinyalleri **(a)** 15 s, **(b)** 30 s, **(c)** 60 s.

(a)

(b)

(c)

Şekil 4.12. Farklı karbon katkılanmış GaN örneklerinin ESR spektrum alanlarının tavlama süresine bağlı değişimleri **(a)** GaN:C₃, **(b)** GaN:C₂, **(c)** GaN:C₁

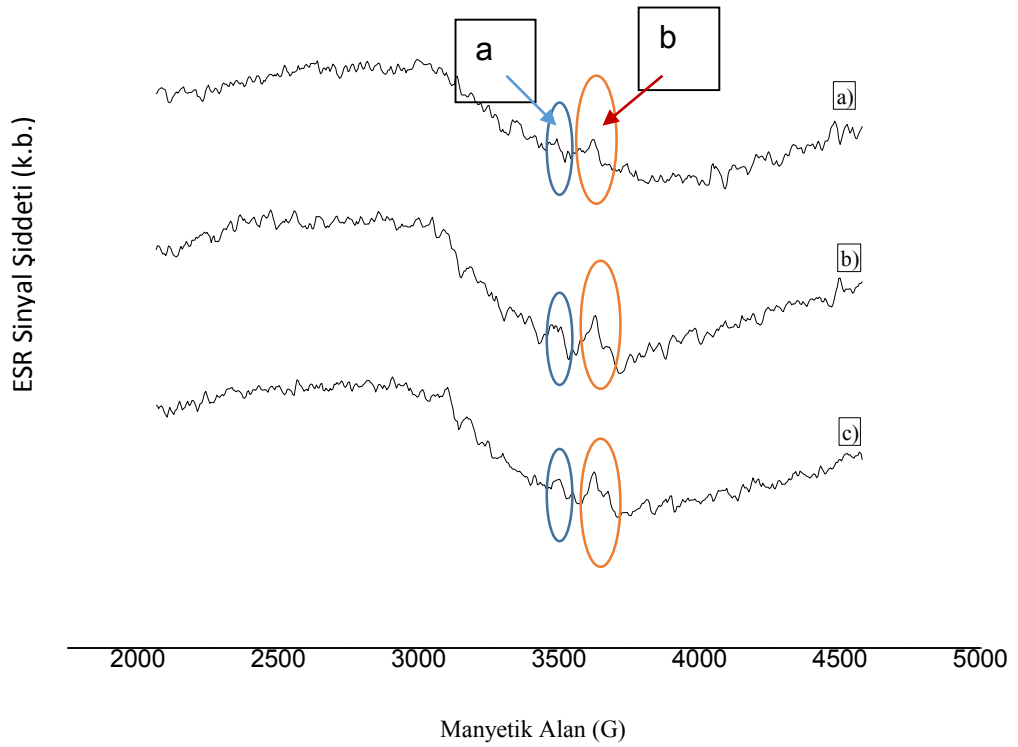
Tavlama çalışmaları süresince farklı karbon katkılanmış GaN örneklerinin spektral parametrelerinin değişmediği görülmüştür. Tavlama çalışmalarında 850 °C sıcaklık değerinde GaN:C₃ örneğinde transistör üretiminde kullanılan 30 saniyelik sürenin optimum değer olduğu görülürken, GaN:C₂ ve GaN:C₁ örnekleri için ise artan tavlama süresi ile ESR spektrumuna katkı veren paramanyetik merkez sayısında azalma gözlenmiştir. Sonuçlar, bazı literatür bilgileri ile uyumludur [16,40-41].

4.2.6. Üretilen GaN Örneklerinde Aşındırma Çalışmaları

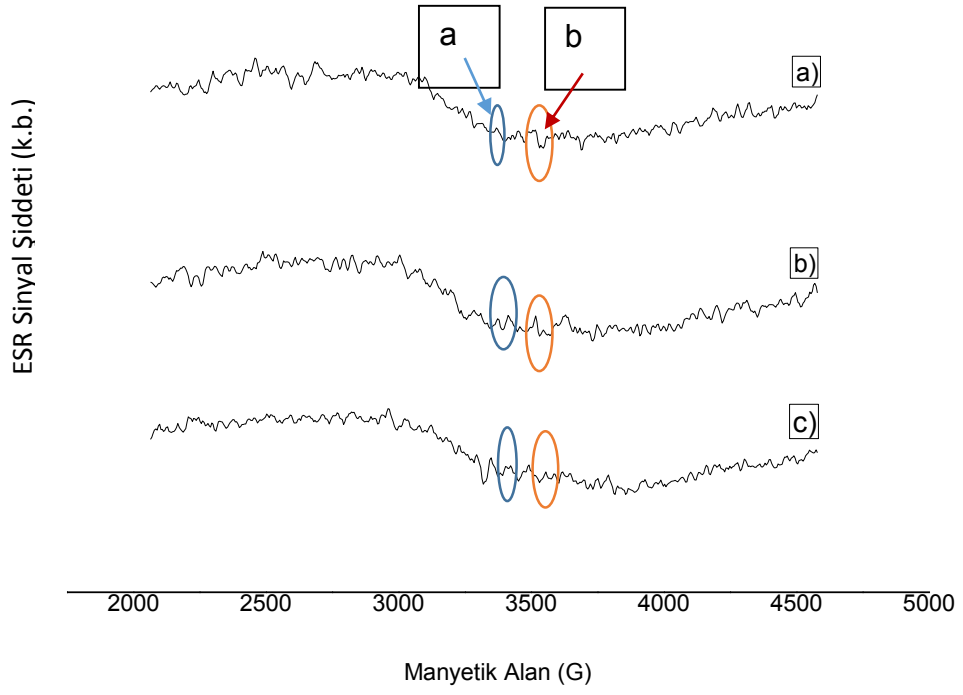
Aşındırma işlemi, izolasyon adacıkları oluşturabilmek için yapılmaktadır. Standart transistör üretiminde 50 W RF gücünde aşındırma işlemi yapılmaktadır. Tez kapsamında 30 W, 50 W ve 100 W'lık aşındırma güçleri karşılaştırılarak aşındırma işleminin serbest radikallere etkisi incelenmiştir. Örneklerin aşındırma çalışmaları süresince, SENTECH ICP RIE SI500 sistemi kullanılmıştır. Örnekler tek tek

yerleştirilerek 30 W, 50 W ve 100 W güç değerinde aşındırma işlemi aynı derinlik değerine (50 nm) ulaşıncaya kadar yapılmıştır.

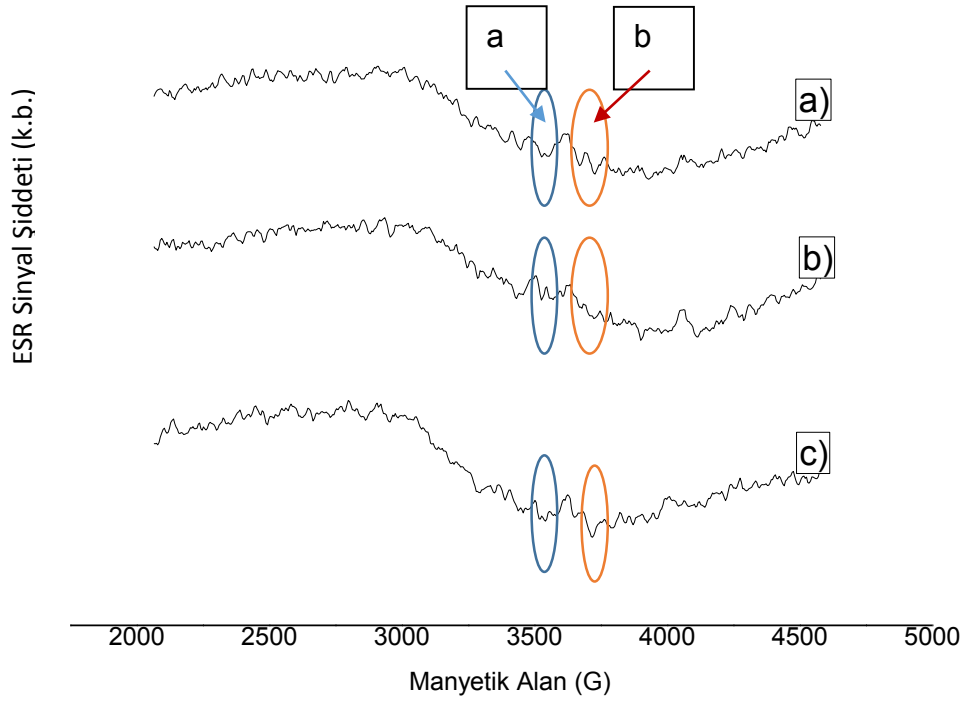
GaN örneklerinin üç farklı aşındırma gücünde kaydedilen ESR spektrumları, Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de verilmiştir. Farklı aşındırma güç değerlerinde GaN örnekleri için kaydedilen ESR spektrum alanlarının aşındırma gücüne bağımlılıkları Şekil 4.16’ da verilmiştir.



Şekil 4.13. GaN:C₃ örneği için aşındırma işlemi sonrasında kaydedilen ESR spektrumları (a) 30 W, (b) 50 W, (c) 100 W



Şekil 4.14. GaN:C₂ örneği için aşındırma işlemi sonrasında kaydedilen ESR spektrumları (a) 30, (b) 50, (c) 100 W



Şekil 4.15. GaN:C₁ örneği için aşındırma işlemi sonrasında kaydedilen ESR spektrumları (a) 30, (b) 50, (c) 100 W

(a)

(b)

(c)

Şekil 4.16. GaN örnekleri için farklı aşındırma güç değerlerinde kaydedilen ESR spektrum alanlarının aşındırma gücüne bağlı değişimleri **(a)** GaN:C₃, **(b)** GaN:C₂, **(c)** GaN:C₁

Aşındırma güç değerinin artması sonucunda GaN örneklerinde hasar ve/veya tuzak merkezlerinin artması beklenir. Bu bağlamda *Şekil 4.16*'da ulaşılan bulgular beklentilere uygundur.

4.2.7. GaN Örneklerinin UV Işınlama Çalışmaları

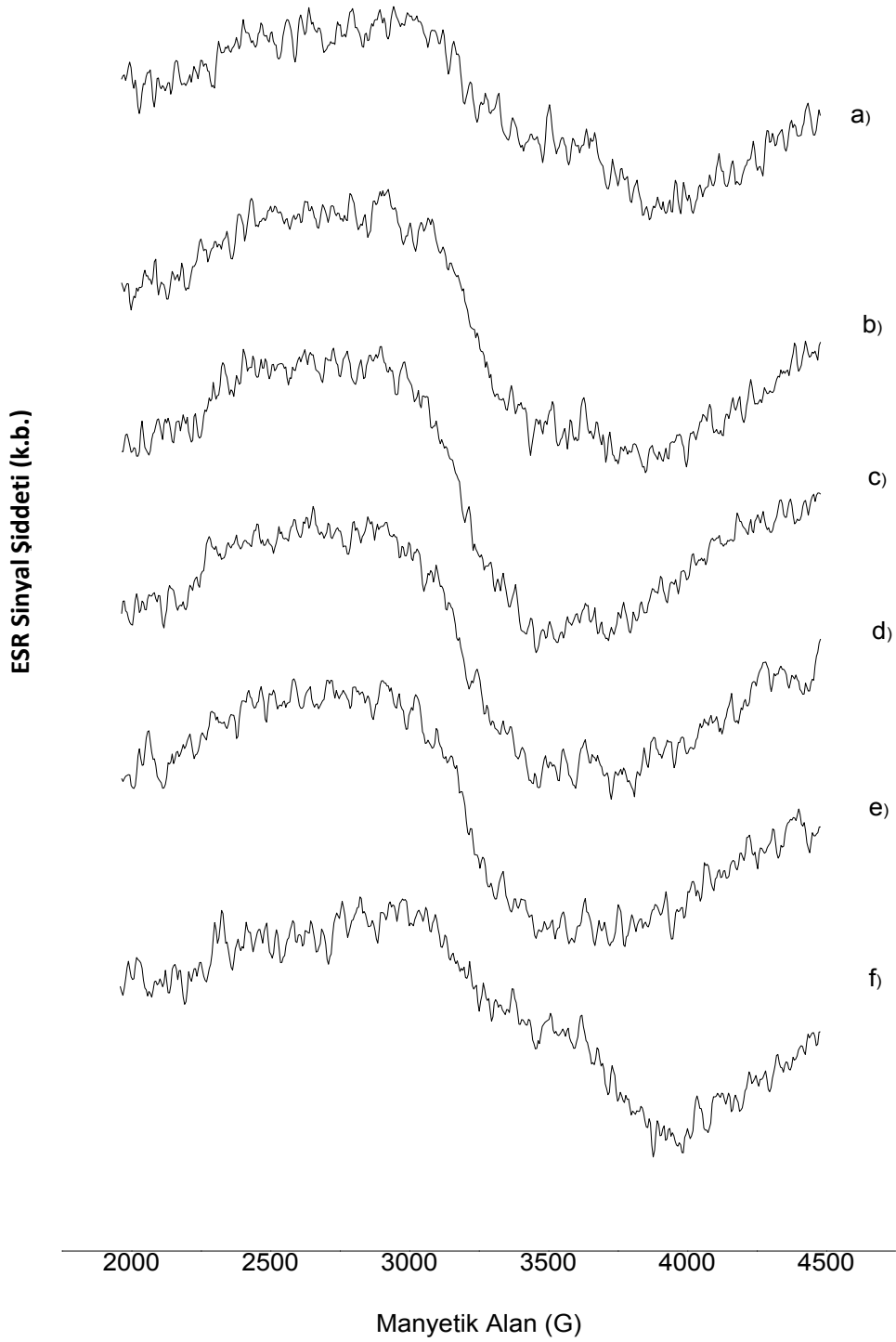
GaN örneklerinin büyütülmesi esnasında oluşabilecek tuzak ve hasar merkezlerinin kaynağının belirlenmesi, GaN kullanılarak yapılan aygıtların performanslarını kontrol altında tutmak için çok belirleyicidir. Işınlamaya karşı kararlı yapısı olduğu bilinen GaN örneklerinin içerisinde bulunan hasar merkez türlerini net olarak belirleyebilmek amacıyla UV ile ışınlanma çalışmaları yürütülmüştür.

Yasak enerji aralıklarının geniş olması ($E_g = 3,39$ eV) nedeni ile UV bölgesinde soğurma yapabildiği düşünülen ve iyi bir optoelektronik malzeme olarak kabul edilen GaN malzemesi yüksek dayanıklılığa sahiptir. Ancak yarıiletkenlerin bir özelliği olarak, aydınlatma ile yasak enerji aralığında serbest elektron-boşluk çiftleri oluşturmak mümkündür [50].

UV çalışmasında, büyütülen GaN epitaksiyel yapılarının ışınlama çalışmaları Termo Oriel marka ve 6295 model 900 W'lık UV ışınları salan Hg (Xe) ark lambası kullanarak gerçekleştirilmiştir. Eklemeli doz metodunun kullanıldığı UV ışınlama çalışmalarında, MOCVD sistemi ile büyütülmüş örnekler 75 cm' lik mesafeden 900 W'lık UV' ye maruz bırakılmıştır. İşlem yaklaşık olarak 2 saat süresince eklemeli doz tekniği ile uygulanmıştır. Sıcaklık işlem süresinde ölçülüp, bir artış olmadığı görülmüştür.

UV ışınlanan GaN örneklerinin organoleptik özelliklerinde değişimler gözlenmemiştir. Bu bulgu, GaN örneklerinin UV ışınlamasına karşı dirençli olduğunun bir göstergesidir. GaN örneklerinde UV ışınlama çalışmaları sonucunda örneklerin ESR spektrumlarında gözlenen değişimler *Şekil 4.17*'de verilmiştir.

Aynı zamanda UV' ye maruz bırakılmış GaN örneklerinin ESR spektrumlarının soğurma eğrileri altında kalan alan hesaplanmıştır (*Şekil 4.18*). Böylelikle, UV ışınlama işleminin GaN örneğinin iç yapısında oluşturabileceği değişikliklerin incelenmesi amaçlanmıştır. *Şekil 4.18*'de verilen UV ışınlanan GaN örneklerinin ESR bulguları irdelendiğinde, UV ışınlamasının 5. dakikasında GaN örneğinde paramanyetik merkez sayısında keskin bir artış, UV ışınlama süresi artmaya devam ettiğinde ise ESR sinyal şiddetinde sürekli bir azalma gözlenmiştir. Yaklaşık 2 saat süresince UV ışınlamasına maruz kalmış GaN örneklerinde sinyal şiddetindeki artış oranı ~%20 olarak hesaplanmıştır.



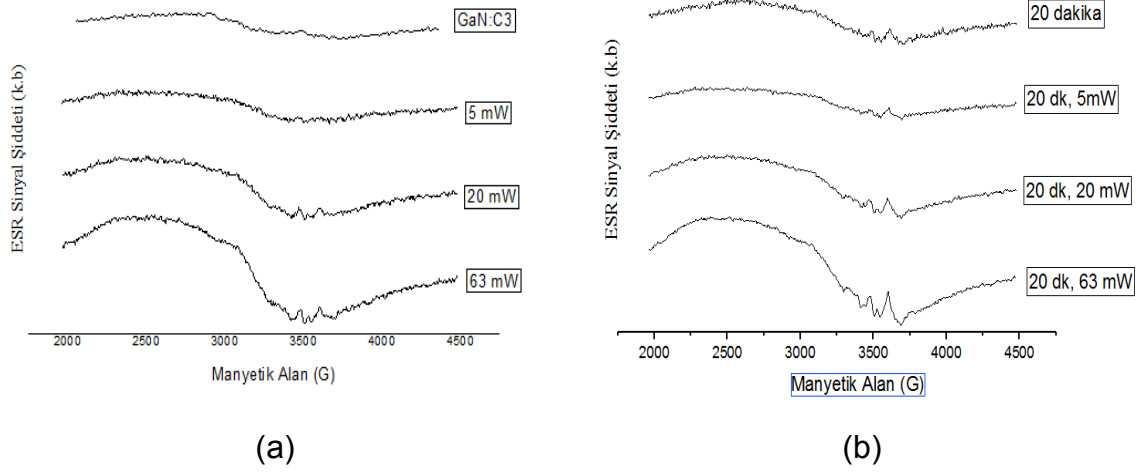
Şekil 4.17. İşlem görmemiş GaN örneğinin farklı UV ışınlama süreleri için kaydedilen ESR spektrumları **(a)** 0, **(b)** 5, **(c)** 15, **(d)** 30, **(e)** 60, **(f)** 110 dk

Şekil 4.18. UV ışınlanmış GaN örneği için kaydedilen ESR spektrum alanlarının UV ışınlama zamanına bağlı değişimleri.

Bilindiği kadarıyla literatürde GaN örneklerinin UV ışınlamasına dair herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bununla beraber GaN örneğinin yapısında bulunabilecek hasar/kusur merkezlerinin tespiti için yapılmış elektron demeti ışınlaması çalışmaları da vardır [15,24].

4.2.8. GaN Örneklerinin X- Işını ile Işınlama Çalışmaları

UV ile ışınlanmış olan örnekler gibi; 35 kV'de 20 dakikalık bir ışınlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Ardından ışınlanmamış örneklerle karşılaştırması yapılmıştır. Şekil 4.19. a' da ışınlanmamış olan örneklerin ESR sinyal şiddetleri, Şekil 4.19.b'de ise ışınlamadan sonra alınmış olan ESR sinyal şiddetleri gösterilmiştir.

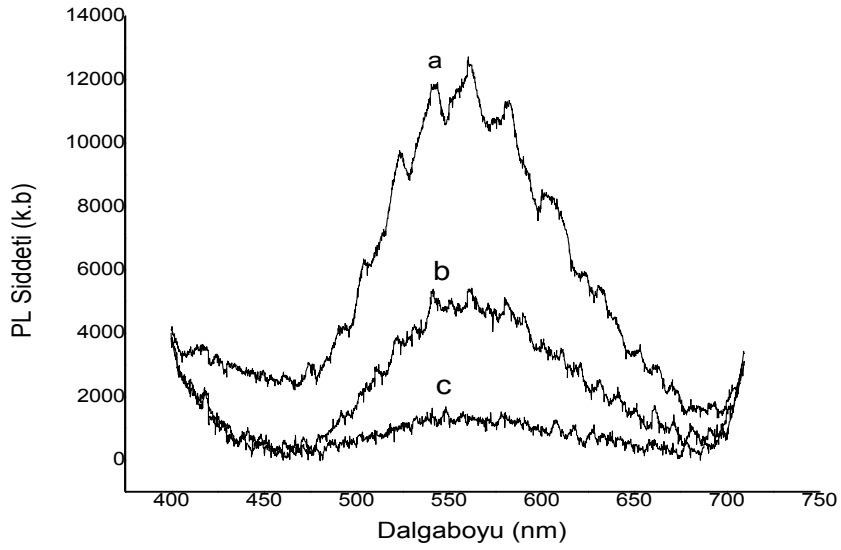


Şekil 4.19. İşlem görmemiş GaN:C₃ örneğinin X-Işını ile (a) ışınlanmamış ve (b) ışınlanmış halinin ESR sinyal şiddeti incelemesi

Şekil 4.19’da görüldüğü gibi genel sinyal şiddetinde ciddi bir değişme görülmemiştir. Ancak derin bölge hasar olarak belirtilen $g_b = 1.9811$ ’deki pikte bir belirginleşme görülmektedir. Genel olarak malzemenin X-Işınına karşı da oldukça dayanıklı olduğu görülmüştür.

4.3. Fotolüminesans (PL) ile Çalışmaları

MOCVD yöntemi ile karbon katkılanmış olarak büyütülen GaN örneklerinin fotolüminesans (PL) ölçümleri işlem görmemiş örnekler için yürütülmüştür. PL ölçümlerinde, Jobin Yvan Triax 550 CCD sistemi kullanılmıştır. Farklı oranlarda karbon katkılanmış GaN örneklerinin PL bulguları, Şekil 4.20’ de verilmiştir.



Şekil 4.20. Farklı karbon katkılı örnekler için PL ölçüm (a) GaN:C₃, (b) GaN:C₂, (c) GaN:C₁

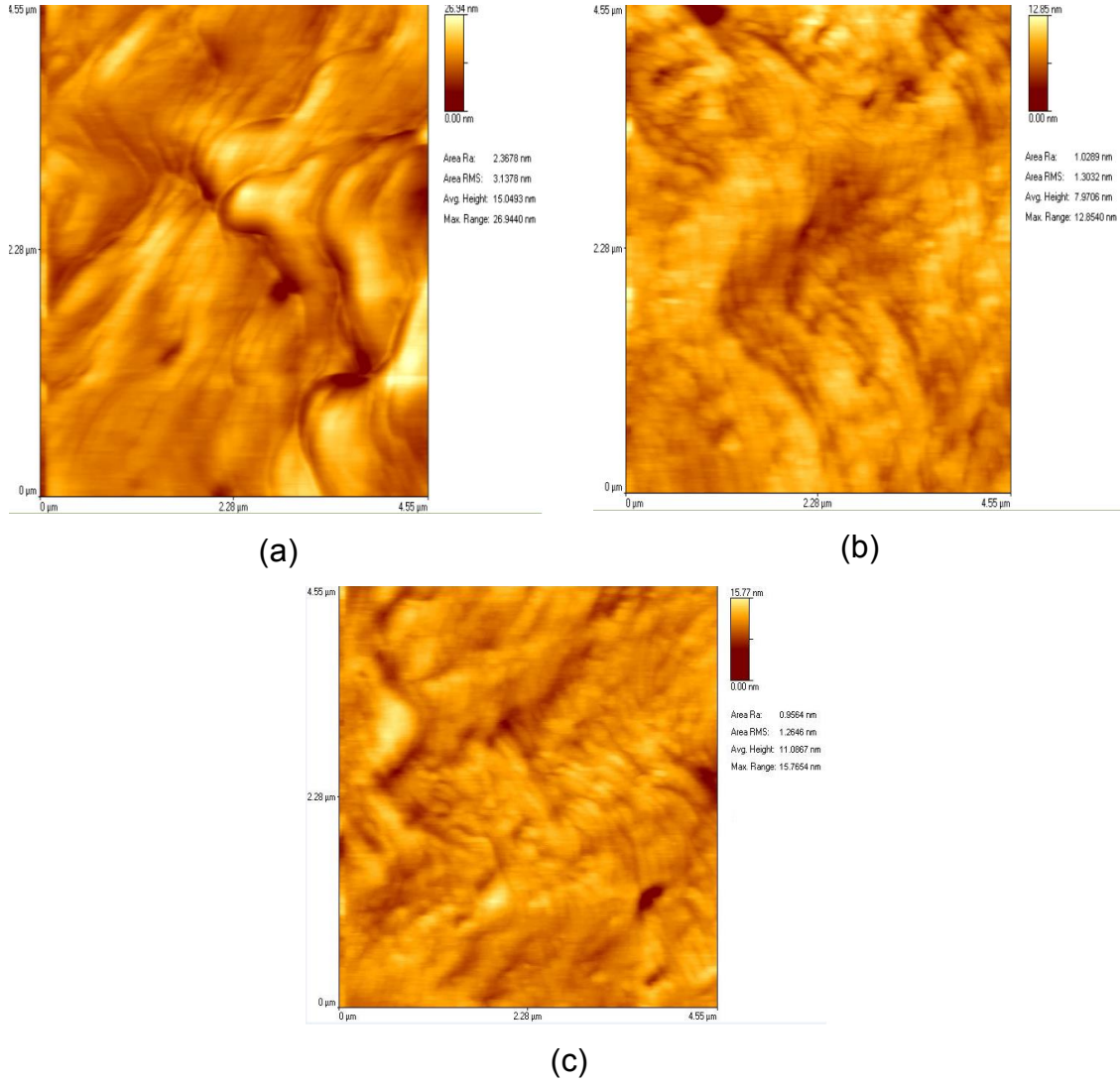
Şekil 4.20’de verilen PL bulguları irdelendiğinde; GaN yapısındaki karbon miktarı arttıkça, PL sinyal şiddetinin de arttığı görülmektedir. PL sonuçları, karbon katkılı GaN epitaksiyel yapısının sarı renge karşı gelen 2,2 eV enerji değerinde yayınım bandı verdiğini göstermektedir. Bu sonuç literatürde GaN örnekleri için ulaşılan PL sonuçları ile uyum içindedir [23,36-39, 49-51].

4.4. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) Çalışmaları

Farklı karbon katkılanmış GaN örneklerinin yüzey pürüzlülüğü, Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) kullanılarak incelenmiştir. AFM çalışmalarında, VEECO CPlI Atomik Kuvvet mikroskobu kullanılarak GaN örneklerinin yüzeyleri maksimum 5×5 µm² lik alanda ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü bilgisi, istatistiksel bir veri olan rms (root mean square) değeri ile verilir.

İşlem görmemiş farklı karbon katkılanarak büyütülmüş GaN örnekleri için elde edilen AFM bulguları, Şekil 4.20’de verilmiştir. GaN yapısındaki karbon katkısının artması ile yapı yüzeyindeki kusurların ve yüzey pürüzlülüğünün artması beklenmektedir [24,46]. Şekil 4.21’de verilen AFM görüntülerinin yüzey pürüzlülük değerleri hesaplandığında, GaN:C₃ örneği için 3,14 nm, GaN:C₂ örneği için 1,30 nm ve GaN:C₁ örneği için 1,26 nm değerlerine ulaşılmıştır. Beklenildiği gibi, 50 mbar’da büyütülmüş olan GaN:C₃ örneği, 200 mbar’da büyütülen GaN:C₁ örneğinden daha

pürüzlü bir yüzeye sahiptir. GaN:C₂ örneği için hesaplanan rms değerinin, GaN:C₁ örneği için belirlenen değere oldukça yakın olduğu görülmektedir [24,46].

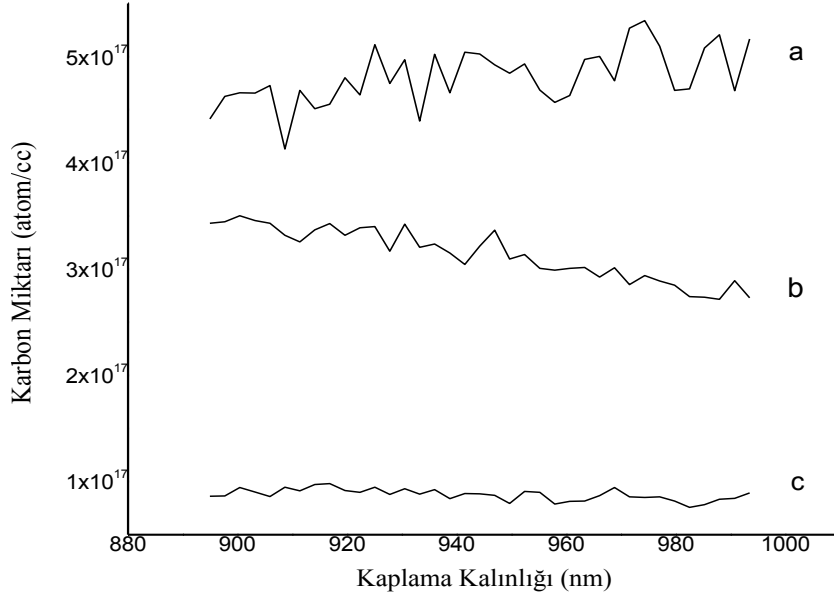


Şekil 4.21. Farklı katkılanmış karbon değerlerine sahip GaN örneklerinin AFM görüntüleri (a) GaN:C₃, (b) GaN:C₂, (c) GaN:C₁

4.5. İkincil İyon Kütle Spektroskopisi (SIMS) Çalışması

İkincil İyon Kütle Spektroskopisi (SIMS), yarıiletkenlerdeki katkı tür ve miktarları, hasar ve tuzak merkezleri ile ilgili önemli bilgiler vermektedir. Ancak SIMS ile incelenen örneğin yapısının derin bölgelerinde bulunan derin bölgelerinde bulunan safsızlıklar, miktarının az olması nedeni ile yanıltıcı sonuçlar verebilir [36-39].

Bu tez çalışmasında farklı karbon katkılanmış GaN örnekleri için elde edilen SIMS sonuçları Şekil 4.22' de verilmiş ve yaklaşık olarak 100'er nm'lik derinlik değerleri için karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.22. Farklı oranlarda karbon katkılanmış GaN örnekleri için SIMS ölçümü sonuçları (a) GaN:C₃, (b) GaN:C₂, (c) GaN:C₁

Farklı oranlarda karbon katkılanmış GaN örnekleri için elde edilen SIMS ölçümleri, farklı basınç değerlerinde büyütülmüş olan GaN epitaksiyel yapısında katkılanan karbon miktarları hakkında bilgi vermektedir. GaN örneğinin büyütülmesi işlemlerinde, daha önce de belirtildiği gibi, GaN epitaksiyel yapısına giren karbon miktarının uygulanan basınç değeri arttıkça azalması beklenmektedir. GaN örneği için elde edilen Şekil 4.22'deki SIMS bulguları bu beklentiyi doğrulamıştır.

Bu çalışma sonucunda farklı oranlarda katkılanmış GaN örnekleri için belirlenen ortalama karbon miktarları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Farklı oranlarda karbon katkılanmış GaN örneklerinde SIMS çalışmaları sonucu hesaplanan karbon miktarları

Büyütme Basıncı Değeri (mbar)	GaN Yapısındaki Karbon Konsantrasyonu (cm ⁻³)
50	5,5x10 ¹⁷
100	2,5x10 ¹⁷
200	9,1x10 ¹⁶

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

GaN; altıgen (wurtzite) kristal yapısında, 3,39 eV'luk geniş bant aralığına sahip bir yarıiletken malzemedir. Yüksek kırılma gerilimi ve yüksek erime sıcaklığına sahip olan GaN, yarıiletken teknolojisinde de sıklıkla kullanılır [1-5]. Bu Yüksek Lisans tez çalışmasında; NANOTAM'da büyütülen GaN yapısı ve bu yapıya transistör üretimi için uygulanacak olan fabrikasyon adımlarının hasar ve kusur durumuna etkisi hakkında bilgi almak amacıyla, ESR yöntemi ağırlıklı olmak üzere, XRD, PL, AFM ve SIMS gibi değişik yöntemlerin kullanıldığı karakterizasyon işlemleri yapılmıştır.

Bu amaçla; büyütme işleminde farklı basınç değerleri kullanılarak farklı oranlarda karbon katkılanmış olarak büyütülen GaN epitaksiyel yapılarının özellikleri, işlem görmemiş ve kaplama, tavlama, aşındırma basamakları uygulanmış GaN örnekleri için yürütülmüştür.

GaN örnekleri için elde edilen ESR bulguları irdelendiğinde, geniş bir manyetik alana yayılmış rezonans sinyaline ($g = 2,181$) ek olarak, GaN örneğinin yapısına katkılanan karbona ait olduğu düşünülen serbest radikal bölgesinde, düşük şiddetli rezonans sinyali ($g = 2,0001$) ve yapının derin bölgelerindeki tuzak/hasar merkezlerinden kaynaklandığı düşünülen düşük şiddetli rezonans piki ($g=1.9311$) gözlenmiştir. Daha uzun süre tavlanan GaN örneklerinin ESR sinyal şiddetlerinde azalmalar, daha yüksek RF güç değerlerinde aşındırılan GaN örnekleri için ise ESR sinyal şiddetlerinde artışlar gözlenmiştir. Bu bulgular değerlendirildiğinde rutin fabrikasyon parametreleri olarak kullanılan 30 saniye tavlama süresi ve 50 W aşındırma güç değerlerinin, denenmiş olan diğer parametrelere göre daha az hasara sebep olduğu sonucuna varılmıştır. GaN örneklerinin UV ışınlanması sonuçları, örneklerin UV ışınlamasına karşı dirençli kabul edilebileceğini göstermiştir.

XRD yöntemi kullanılarak GaN yapısına katkılanan karbon miktarının kristal yapıya etkisi incelendiğinde, karbon miktarı arttıkça GaN örneğine ait olan XRD pikinin daha küçük yansıma açılarında kaydığı görülmüştür.

PL sonuçları, karbon katkılı GaN epitaksiyel yapısının 2,2 eV'da (sarı renk) yayılım bandı verdiğini ve yapıdaki karbon miktarı arttıkça PL sinyal şiddetinin arttığını göstermiştir.

SIMS ölçümleri; büyütme basıncı arttıkça GaN yapısına katılan karbon miktarının azaldığını göstermiştir.

AFM sonuçları, GaN yapısına katılanmış karbon miktarı ile yapının yüzey pürüzlülük değerinin arttığı görülmüştür.

Elde edilen tüm bulgular değerlendirildiğinde; genel olarak tez çalışması boyunca değişik yöntemlerle ulaşılan bulguların birbirleri ile uyum içerisinde oldukları görülmektedir. Gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda, büyütülen GaN örneklerin yapısal, manyetik ve optik özellikleri hakkında önemli bilgilere ulaşılmış, GaN yapısında oluşabilecek hasar merkezleri hakkında irdelemeler yapılmıştır.

Tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçların uygulamada da yer bulması, bu çalışmanın önemli hedeflerindedir. Ayrıca ulaşılan bulguların birçok yeni araştırmaya öncülük edeceğine inanılmaktadır.

KAYNAKÇA

- [1] Mishra, U. K., Shen, L., Kazior, T. E. and Wu, Y. F, GaN-Based RF Power Devices and Amplifiers, *Proceedings of the IEEE*, 96(2), 287-305, 2008.
- [2] Nishinga, T., *Handbook of Crystal Growth: Bulk Crystal Growth*, (ed: Rudolph, P.), Elsevier, UK, 108-120, **2015**.
- [3] Shah, P. B., Dedhia, R. H., Tompkins R. P., Viveiros, E. and Jones, K. A., *Analysis of Gallium Nitride (GaN) and Aluminum Gallium Nitride (AlGaN) Trap Characteristics through Deep-Level Transient Spectroscopy (DLTS), Current-Voltage (I-V), and Capacitance Methods*, Army Research Laboratory, Adelphy, **2012**.
- [4] Amano, H., Sawaki, N., Akasaki, I. and Toyoda, Y., Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer, *Applied Physics Letters*, 48 (5), 353-355, **1986**.
- [5] Lopatiuk, O., Osinsky, A., Dabiran, A., Gartsman, K., Feldman, I. and Chernyak, L., Electron trapping effects in C- and Fe-doped GaN and AlGaN, *Solid-State Electronics* 49, 1662–1668, **2005**.
- [6] Pearton, S. J., Zolper, J. C., Shul, R. J. and Ren, F., GaN: Processing, defects and devices, *Journal of Applied Physics*, 86(1), 1-78, **1999**.
- [7] Hinderberger D, Jeschke G., *Site-specific characterization of structure and dynamics of complex materials by EPR spin probes. In: Webb GA (ed) Modern magnetic resonance*. Springer, London, **2006**.
- [8] Lyons, J. L., Janotti, A. and Van de Walle, C. G., Carbon impurities and the yellow luminescence in GaN, *Applied Physics Letters*, 97, 152108(1-3), **2010**.
- [9] Tang, H., Webb, J. B., Bardwell, J. A., Raymond, J., Salzman C. And Uzan-Saguy, C., Properties of carbon-doped GaN, *Applied Physics Letters*, 78(6), 757-759, **2001**.
- [10] Kato, S., Satoh, Y., Sasaki, H., Masayuki, I. and Yoshida, S., C-doped GaN buffer layers with high breakdown voltages for highpower operation AlGaIn/GaN HFETs on 4-in Si substrates by MOVPE, *Journal of Crystal Growth*, 298, 831-864, **2007**.
- [11] Choi, Y. C., M Pophristic, M., Peres, B., Cha, H-Y., Spencer, M. G. And Eastman, L. F., High breakdown voltage C-doped GaN-on-sapphire HFETs with a low specific on-resistance, *Semiconductor Science and Technology*, 22, 517-521, **2007**.
- [12] Poblentz, C., Waltereit, P., Rajan, S., Heikman, S., Mishra, U. K. and Speck, J. S., Effect of carbon doping on buffer leakage in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors, *Journal of Vacuum Science Technologie*, 22, 1145, **2004**.
- [13] Glaser, E.R., Freitas, J.A., Braga, G.C., Carlos, W.E., Twigg, M.E., Wickenden, A.E., Kolesk, D.D., Henry, R.L., Leszczynski, M., Grzegory, I., T. Suski, Porowski, S., Park, S.S., Lee, K.Y. and Molnar, R.J., Magnetic resonance studies of defects in GaN with reduced dislocation densities, *Physica B*, 51–57, **2001**.

- [14] Chow, K. H., Vlasenko, L. S., Johannesen, P., Bozdog, C. and Watkins, G. D., Intrinsic defects in GaN. I. Ga sublattice defects observed by optical detection of electron paramagnetic resonance, *Physical Review B*, 69(4), 045207 1-9, **2004**.
- [15] Denninger, G., Beerhalter, R., Reiser, D., Maier, K., Schneider, J., Detchprohm, T. and Hiramatsu, K., Shallow Donors in GaN: A Magnetic Double Resonance Investigation, *Solid State Communications*, 99(5), 347-351, **1996**.
- [16] Palczewska, M., Suchanek, B., Dwiliski, R., Paku, K., Wagner, A. and Kamiska, M., Paramagnetic defects in GaN, *MRS Internet Journal Nitride Semiconductor*, 45, 1-3, **1998**.
- [17] Razeghi, M. and Henini, M., *Optoelectronic Devices: III-Nitrides*, Elsevier, 15-16, **2004**.
- [18] Jones A. C. ve Hitchman M. L., *Overview of Chemical Vapour Deposition* (1. Baskı), İskoçya: Royal Society of Chemistry, 1-37, **2009**.
- [19] Bernardini, F., Fiorentini, V. and Vanderbilt, D. Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides, *Physical Review B*, 56(16), 10024-10027, **1997**.
- [20] B. Monemar and G. Pozina, Group III-nitride based hetero and quantum structures, *Prog. Quantum Electron.*, vol. 24, pp. 239–290, **2000**.
- [21] Fletcher A.S. A. and Nirmal, D., A survey of Gallium Nitride HEMT for RF and high power applications, *Superlattices and Microstructures*, 109, 519-537. **2017**.
- [22] Ambacher, O., Polarization Induced Effects in GaN/AlGaN Heterostructures, *Acta Phsica Polanica A.*, 98(3), 195-201, **2000**.
- [23] Armitage, R., Yang, Q., Feick, H., Park, Y. and R. Weber, E. R., Electrical and Optical Properties of Carbon-Doped GaN Grown by MBE on MOCVD GaN Templates Using a CCl₄ Dopant Source, Presented at 2002 MRS Spring meeting, San Francisco, CA, USA, April 2-5, **2002**.
- [24] Bonanni, A., Kiecana, M., Simbrunner, C., Li, T., Sawicki, M., Wegscheider, M., Quast, M., Przybylinska, H., Navarro-Quezada, A., Jakiela, R., Wolos, A., Jantsch, W. and Diet, T., Paramagnetic GaN:Fe and ferromagnetic (Ga,Fe)N: The relationship between structural, electronic, and magnetic properties, *Physical Review B*, 75(12), 1-21, **2007**.
- [25] Heikman, S., Keller, S., Mates, T., DenBaars, S.P., and Mishra, U.K., Growth and characteristics of Fe-doped GaN, *Journal of Crystal Growth*, 248, 513–517, **2003**.
- [26] Gordy, W., *Theory and Applications of Electron Spin Resonance*, John Wiley & Sons Inc, New York, **1980**.
- [27] Apaydın, F., *Magnetik Rezonans*, Hacettepe yayınları, **1991**.
- [28] Wright, J.R., Hendrickson, W. A., Osaki, S. and James, G. T., *Physical Methods for Inorganic Biochemistry*, Plenum Press, New York and London, 165-211, **1986**.

- [29] Weil J. A. , Bolton, J.R. Wertz J. E., *Electron paramagnetik Rezonance: Elementary Theory n Applications*, Wiley-Interscience, New York, **1994**.
- [30] Greene, K. D., Electron Paramagnetic Resonance Spectroscopy and Hall Effect Studies of The Effects of Low Energy Electron Irradiation on Gallium Nitride (GaN), Department of the Air Force, Air University, Ohio, **2003**.
- [31] Toprak, A. Gate Uzunluğunun GN HEMT Aygıtlarda Güç Performansına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, **2014**.
- [32] Butt, H.-J., Cappella, B. and Kappl, M., Force Measurements with the Atomic Force Microscope: Technique, Interpretation and Applications, *Surface science reports*, 59(1):1–152, **2005**.
- [33] Van Der Heide, P., Secondary Ion Mass Spectrometry: An Introduction to Principles and Practices, Wiley, USA, 148-151, **2014**.
- [34] Li, X., Bergsten, J., Nilsson, D., Danielsson, O., Pedersen, H., Rorsman, N., Janzén, E. and Forsberg, U., Carbon doped GaN buffer layer using propane for high electron mobility transistor applications: Growth and device results, *Applied Physics Letter*, 107, 1-6, **2015**.
- [35] Biçer, Bakır Nanopartiküllerin sentezi ve karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Sakarya, **2018**.
- [36] Behera, J.K., Synthesis and characterization of ZO Nanoparticles, Master of Science in Physics, Department of Physics NAtion Institutr of Technology, India, **2004**.
- [37] Zimmermann,F., Beyer, F.C., Gartner, G., Rode, C., Son, N.T., Janz, E., Vesel, D., Lorin, C., Hofmann, P., M. Krupinski, M., Mikolajick, T., g, F. Habel, F., Leibiger, G., Heitmann, J., Origin of orange color in nominally undoped HVPE GaN crystals, *Optical Materials*, 70, 127-130, **2017**.
- [38] Paku, K., Wojdak, M., Palczewska, M., Suchanek, B. and Baranowski, J. M., Luminescence and ESR Spectra of GaN:Si Below and Above Mott Transition, *MRS Internet Journal Nitride Semiconductor*, 34, 1-4, **1998**.
- [39] Reshchikov, M. A., Usikov, A., Helava, H., Makarov, Y., Prozheev, A., Makkonen, I., Tuomisto, F., Leach, J. H. and Udvary, K., Evaluation of the concentration of point defects in GaN, *Scientific Report*, 7, 1-11, **2017**.
- [40] Colak, S. and Korkmaz, M., Spectroscopic Features of Radiolytic Intermediates Induced in Gamma Irradiated Sulfatiazole: an ESR Study, *International Journal of Pharmaceutics*, 285, 1–11, **2004**.
- [41] Colak, S., Investigation of Radiosterilization of Benzydamine Hydrochloride by Electron Spin Resonance Spectroscopy, *Radiation Physics and Chemistry*, 127, 204–209, **2016**.
- [42] Reshchikov, M. A., Point Defects in GaN, Department of Physics, Virginia Commonwealth University, Richmond, Virginia, USA, 315-360, **2005**.
- [43] Suchanek, B., M. Palczewska, M., Pakulla, K., Baranowski, J. and Kamiska M. Electrical and ESR Studies of GaN Layers Grown by Metal Organic Vapor Deposition, *Acta Physica Polonica A*, 92(5), 1001-1004, **1997**.

- [44] Bayerl, M. W., Brandt, M. S. and Stutzmann, M., Electrically Detected Magnetic Resonance (EDMR) of defects in GaN Light Emitting Diodes, *Physical Status Solid*, 159, 5-6, **1997**.
- [45] A. Wolos a,n, Z. Wilamowski a,b, C. Skierbiszewski c, A. Drabinska d, B. Lucznik, Electron spin resonance and Rashba field in GaN-based materials, *Physica B*, 406, 2548-2554, **2011**.
- [46] Caban, P., Strupinski, W., Szmidt, J , Marek Wojcik, M., Gaca, J., Kelekci, O., Caliskan, D., Ozbay E, Effect of Growth Pressure on Coalescence Thickness and Crystal Quality of GaN Deposited on 4H–SiC, *Journal of Crystal Growth*, 315,168–173, **2011**.
- [47] Jinn Chang, S. and Joue Young, S. ZnO Ultraviolet Photodiodes with Pd Contact Electrodes, *Research Express*, 1(8), 329-333, **2007**.
- [48] Ramaiah, K. S, Su, Y.K., Chang, S. J., Juang, F. S., Chen, C.H. Photoluminescence Characteristics of Mg- and Si Doped GaNthin films grown by MOCVD Technique, *Journal of Crystal Growth*, 220, 405-412, **2000**.
- [49] Yousefi, R., Jamali-Sheini, F., Cheragzade, M., Khosravi-Gandomani, S., Saade, A., Huang, N. M., Basirun, W. J., Azarang, M., Enhanced visible light photocatalytic actiivity of stronium doped zinc oxide nanoparticles, *Material Science and Semiconductors*, 32, 152-159, **2015**.
- [50] Schneider, J. J., Hoffman, R. C., Engstler, J., Dilfer, S., Klyszcz, A., Erdem, E., Jakes, P., Eichel, R., Zinc oxide Derived from Single Source Precursor Chemistry Under Chiminie Douce Conditions: Formation Pathway, Defect Chemistry and Possible Applications in Thin Film Printing, *Journal of Materials Chemistry*, **2009**.
- [51] Ramaiah, K. S, Su, Y.K., Chang, S. J., Juang, F. S., Chen, C.H. Photoluminescence Characteristics of Mg- and Si Doped GaNthin films grown by MOCVD Technique, *Journal of Crystal Growth*, 220, 405-412, **2000**.
- [52] Zvanut, M. E., Electron Paramagnetic Resonance Characterzation of Point Defects, 1521-1551, **2009**.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı: Kübra Elif ASAN

Doğum yeri: Ağrı

Medeni Hali: Bekar

E-posta: kubraelif.asan@bilkent.edu.tr

Adres: Emek Mahallesi, Bişkek Caddesi, Eski 75. Sokak, 124/1

Çankaya /ANKARA



Eğitim

Lise: Amasya Anadolu Lisesi

Lisans: Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği

Yüksek Lisans: Hacettepe Üniversitesi Nanoteknoloji-Nanotıp

Anabilim Dalı

Yabancı Dili ve Düzeyi

İngilizce, iyi

İş Deneyimi

Eylül 2015- Mayıs 2017, Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (NANOTAM)

Mayıs 2017 – Halen, Aselsan Bilkent Mikro Nano Teknolojileri Sanayi ve Ticaret A.Ş.

Deneyim Alanları:

Nano-aygıt üretim teknolojisi, Plazma Sistemleri

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi:

Tezden Üretilmiş Yayınlar:

Tezden Üretilmiş Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar :

MBIO 2017, Poster Sunumu



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
NANOTEKNOLOJİ NANOTİP ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 26/06/2018

Tez Başlığı / Konusu: GaN İnce Filmlerin ESR Spektroskopisi ile İncelenmesi

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 53 sayfalık kısmına ilişkin, 26/06/2018 tarihinde ~~çalışmam~~/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %5'tir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/dâhil
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

26/06/2018

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Kübra Elif ASAN
Öğrenci No: N13229700
Anabilim Dalı: Nanoteknoloji Nanotıp Anabilim Dalı
Programı:
Statüsü: Y.Lisans Doktora Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Prof. Dr. Seyda Çokluk
(Unvan, Ad Soyad, İmza)