

**Al_{0.52}Ga_{0.48}N SCHOTTKY FOTODETEKTÖR YAPININ
OPTİKSEL VE YÜZEYSEL ÖZELLİKLERİ**

Burcu YILDIRIM

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İLERİ TEKNOLOJİLER**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞUBAT 2007
ANKAR**

Burcu YILDIRIM tarafından hazırlanan $Al_{0.52}Ga_{0.48}N$ SCHOTTKY FOTODEDEKTÖRÜN OPTİKSEL VE YÜZEYSEL ÖZELLİKLERİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Mehmet ÇAKMAK
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile İleri Teknolojiler Anabilim Dalında Yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: : Prof. Dr. Ali Gencer _____

Üye : Prof. Dr. Süleyman Özçelik _____

Üye : Prof. Dr. Tofiq Mammadov _____

Üye : Prof. Dr. Mehmet Kasap _____

Üye : Doç. Dr. Mehmet Çakmak _____

Tarih : 09/02/2007

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Burcu YILDIRIM

**Al_{0.52}Ga_{0.48}N SCHOTTKY FOTODETEKTÖR YAPININ OPTİKSEL VE
YÜZEYSEL ÖZELLİKLERİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Burcu YILDIRIM

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Şubat 2007

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, Al_{0.52}Ga_{0.48}N üçlü alaşımının tavlama işlemi uygulanarak yüzey morfolojisinin ve PL spektrumundaki değişimin araştırılmasıdır. Alaşımın oda sıcaklığında, 800, 900, 960 °C'de 240 sn tavlandıktan sonra Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ve Fotoluminesans (PL) ölçümleri alınmıştır. Tavlama sıcaklığına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü önemli ölçüde azaldı. Bununla birlikte PL şiddeti tavlamaya bağlı olarak önemli bir artış gösterdi.

Bilim Kodu : 202.1.147
Anahtar Kelimeler : Yüzey, AlGaN, Fotoluminesans, Dedektör
Sayfa Adedi : 49
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Mehmet ÇAKMAK

**THE OPTICAL AND MORPHOLOGICAL PROPERTIES OF ALGAN
SCHOTTKY PHOTODETECTOR**

(M.Sc. Thesis)

Burcu YILDIRIM

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

February 2007

ABSTRACT

The purpose of this study is to search the change of surface morphology and photoluminescence spectrum by annealing the ternary alloy $\text{Al}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{N}$. After annealing the alloy at the room temperature, $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, $960\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 240 s, the measurements of AFM and PL has been done. On the other hand, it is observed that by increasing temperature surface roughness (RMS) falls down sharply. Besides that, PL radiation intensity exhibits significant increase with annealing.

Science Code : 202.1.147
Key Words : Surface, AlGa_N, Photoluminescence, Detector
Page Number : 49
Adviser : Assoc. Prof. Dr. Mehmet Çakmak

TEŞEKKÜR

Çalışmaların boyunca değerli katkıları ile beni yönlendiren danışman Hocam Doç. Dr. Mehmet ÇAKMAK'a teşekkür ederim. Tez çalışmalarım esnasında katkılarından dolayı Süleyman ÇÖREKÇİ, Zeki TEKELİ, Sibel ÖZKAYA, Demet USANMAZ'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim süresince bana sağladıkları her türlü maddi ve manevi destekleri nedeniyle aileme, özellikle ablam Didem ATALAY'a teşekkür ederim.

Bu tez 2001 K120590 kodlu DPT projesi tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER**Sayfa**

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. FOTODEDEKTÖRLER	8
3. DENEYSEL TEKNİKLER	14
3.1. Kristal Büyütme Teknikleri	15
3.1.1. Metal organik kimyasal buhar birikimi (MOCVD)	15
3.1.2. Moleküler demet epitaksi (MBE)	17
3.2. Isıtma Tekniği	17
3.2.1. Isısal tavlama	17
3.3. Yapısal teknikler	19
3.3.1. Düşük enerjili elektron kırınımı (LEED)	19
3.3.2. Yansımali yüksek enerjili elektron kırınımı (RHEED)	20
3.3.3 Taramalı tünelleme mikroskobu (STM).	21
3.3.4. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM)	24
3.4. Yüzey Kimyasal Bileşimleri	27
3.4.1. Fotoelektron spektroskopu	2

	Sayfa
3.4.2 Auger spektroskopu	28
3.5. Optiksel Teknikler.....	29
3.5.1. Fotolüminesans (PL)	29
3.5.2. Fotolüminesans uygulamaları	31
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	34
4.1. Yüzey Karakterizasyonu	35
4.1.1. Örneğin tavlama işlemi öncesi yüzey özellikleri	35
4.1.2. Örneğin 800 °C'ye tavlama sonrası yüzey özellikleri.....	37
4.1.3. Örneğin 900 °C'ye tavlama sonrası yüzey özellikleri.....	38
4.1.4. Örneğin 960 °C'ye tavlama sonrası yüzey özellikleri	39
4.2. Optiksel Karakterizasyon.....	41
4.2.1. Fotolüminesans sonuçları.....	41
5. SONUÇ	44
KAYNAKLAR	45
ÖZGEÇMİŞ	49

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. $Al_{0,52}Ga_{0,48}N$ Örneğinin Şematik Yapısı.....	34
Çizelge 4.2. Tavlama Sıcaklığına Karşı Pürüzlülük (RMS) Değerleri	40

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Zolper ve arkadaşlarının çalışmasında GaN'ın 1100 °C'deki PL spektrumu a) Ar ortamında b) N ₂ ortamında c) Tavlama işlemi öncesi PL spektrumu.....	3
Şekil 1.2. Kumar ve arkadaşlarının çalışmasında MOCVD ile büyütülmüş GaN epitaksiyel katmanlarının tavlama öncesi ve sonrasında oda sıcaklığındaki PL spektrumu.....	5
Şekil 2.1. Fotodiyot'daki algılama olayının şematik gösterilmesi.....	11
Şekil 2.2. a) Schottky fotodiyodun yapısı b) Eklem bölgesinde enerji seviyesinin davranışı.....	12
Şekil 3.1. Atmosferik basınç reaktörünün şematik gösterimi.....	16
Şekil 3.2. LEED deneysel düzeneği.....	19
Şekil 3.3. STM ile fotoğrafı çekilmiş Si yüzeyi.....	21
Şekil 3.4. Bir engelde tünelleme	22
Şekil 3.5. STM'in çalışma prensibinin şematik gösterimi	23
Şekil 3.6. İğne sensörü (needle sensor).....	25
Şekil 3.7. AFM'in çalışma prensibinin şematik gösterimi.....	26
Şekil 3.8. Tek bir atom tarafından emilmenin basit sunumu	27
Şekil 3.9. Yayılan Auger elektronlarının spektrumu	29
Şekil 3.10. Foton enerjisine karşı soğurma olasılığı	30
Şekil 3.11. Foton soğurması ile iletkenlik bandına geçiş.....	30
Şekil 3.12. Fotoluminesans ölçümlerinde kullanılan deneysel düzenek.....	32
Şekil 3.13. Fotoluminesans ölçümlerinde gerçekleşen fiziksel olaylar	33
Şekil 4.1. Örneğin tavlama işlemi öncesi a) 2x2 µm ² b) 5x5 µm ² tarama alanlı AFM görüntüsü	36

Şekil	Sayfa
Şekil 4.2. Örnek yüzeyi üzerindeki a) Step yükseklik farkı b) Ortalama step genişliği	37
Şekil 4.3. Örneğin 800 °C'ye tavlama işlemi sonrası a) 2x2 µm ² b) 5x5 µm ² tarama alanlı AFM görüntüsü	38
Şekil 4.4. Örneğin 900 °C'ye tavlama işlemi sonrası a) 2x2 µm ² b) 5x5 µm ² tarama alanlı AFM görüntüsü	39
Şekil 4.5. Örneğin 960 °C'ye tavlama işlemi sonrası a) 2x2 µm ² b) 5x5 µm ² tarama alanlı AFM görüntüsü	40
Şekil 4.6. a) Yaptığımız çalışmada N ₂ ortamında tavlanan AlGaN için pürüzlülük durumu b) Zolper ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada N ₂ ve Ar ortamında tavllanmış örnekler için yüzey pürüzlülük durumu.....	41
Şekil 4.7. Tavlama sıcaklığına göre PL grafiği	42

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
f	Frekans
h	Planck sabiti
λ	Dalga boyu
m	Kütle
v	Hız
E	Enerji
ν	Frekans
K	Elektronun kinetik enerjisi
E_i	Atomun başlangıç durumundaki enerjisi
E_f	Atomun son durumundaki enerjisi
E_B	Bağlanma enerjisi
E_c	İletim bant enerjisi
E_v	Valans bant enerjisi
E_g	Yasak enerji aralığı

Kısaltmalar	Açıklama
AES	Auger Elektron Spektoskobu
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
FD	Fotodetektör
LEED	Düşük Enerjili Elektron Kırınımı
LT	Düşük Sıcaklık
MBE	Moleküler Demet Epitaksi

Kısaltmalar	Açıklama
MOCVD	Metal Organik Kimyasal Buhar Birikimi
MOVPE	Metal Organik Buhar Faz Epitaksi
MYM	Metal-Yarıiletken-Metal
PL	Fotoluminesans
PS	Fotoelektron spektroskopu
RHEED	Yansımali Yüksek Enerjili Elektron Kırınımı
RMS	Yüzey Pürüzlülük Değeri
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
STM	Taramalı Tünelleme Mikroskobu
TMG	TriMetilGalyum
TMA	TriMetilAlimünyum
TMI	TriMetilİndiyum
UHV	Ultra Yüksek Vakum
UPS	Ultraviole Fotoelektron Spektroskopu
UV	Ultra Violet
XPS	X ray Fotoelektron Spektroskopu

1.GİRİŞ

Yarıiletkenler, elektrik iletkenliği açısından iletken ve yalıtkanlar arasında yer almaktadır. Yarıiletkenlerin sıcaklık, optiksel uyarılma vb. değişimi, elektronik aletler için yarıiletken materyallerin seçilmesine imkan sağlar.

Yarıiletkenler doğada saf olarak bulunmazlar ancak çeşitli kristal büyütme teknikleri kullanılarak yapay olarak büyütülebilir. Bu tekniklerden en önemli ikisi MBE (Molecular Beam Epitaxy) ve MOCVD (Metal-Organic Chemical Vapour Deposition) dir. MBE, özellikle araştırma laboratuvarlarında tercih edilen bir tekniktir. Ancak ticari uygulamalar açısından seri üretim yapan MOCVD tekniği kullanılmaktadır.

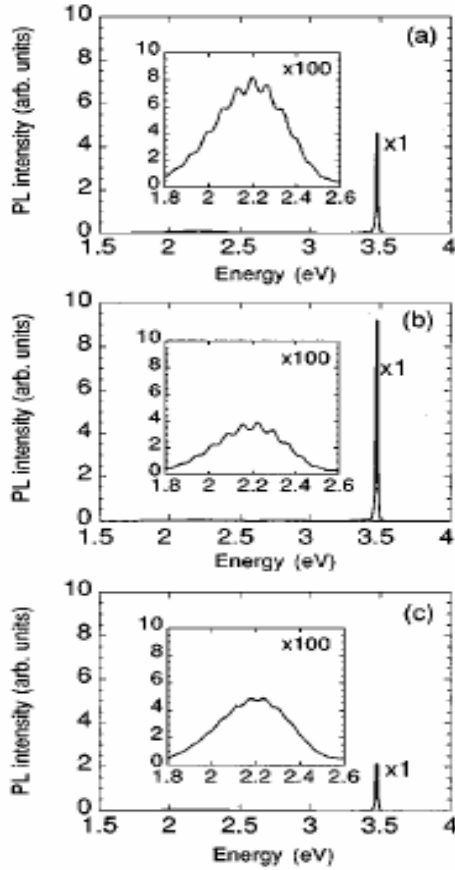
Yarıiletkenler oluşum biçimlerine göre beş ana başlık altında toplanabilir; *Elementsel Yarıiletkenler*: Si ve Ge, *Bileşik Yarıiletkenler*: GaAs ve InP, *Üçlü Yarıiletkenler*: $Al_xGa_{1-x}N$ ve $Ga_xIn_{1-x}As$, *Dörtlü Yarıiletkenler*: $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$, *Alaşım Yarıiletkenler*: Üçlü veya dörtlü yarıiletkenlerdir. Alaşım yarıiletkenlerde bant yapısı, örgü sabiti gibi fiziksel özellikler, kendisini meydana getiren ikili yarıiletkenlerden farklıdır. Ayrıca bileşik yarıiletkenler periyodik cetveldeki yerlerine göre adlandırılır (Örneğin III-V, II-VI).

Yarıiletkenler teknolojinin pek çok alanında yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Örneğin Si ve Ge mikrochip üretiminde; GaAs, lazer teknolojisinde çok önemlidir. Ancak Si, Ge ve GaAs gibi düşük band aralığına sahip yarıiletkenleri temel alan uygulamalarda; materyal parametrelerinin limitlerine yaklaşılması, ısınma vb. problemler nedeni ile yeni materyallere ihtiyaç duyulmuştur. Bu ihtiyacı karşılamak

için araştırmalar SiC ve GaN gibi geniş bant aralıklı yarıiletkenler üzerine odaklanmıştır. Diğer III-V yarıiletkenlere göre üstün fiziksel özelliklere sahip olan GaN; ışık yayan diyotlar, laser diyotlar, transistörler ve fotodedektörler için çok dikkat çeken bir materyaldir [2]. Örneğın GaN temelli LED'ler; trafik sinyalleri, tam renkli görüntüleyiciler gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra GaN temelli yüksek elektron mobiliteli transistörler yüksek güç, yüksek frekans ve yüksek sıcaklık elektroniklerinde kullanılmaktadır. Ayrıca geniş direkt bant aralığına sahip AlGaIn, çok duyarlı güneş körü (solar blind) ve görünür körü (visible blind) UV fotodedektörlerin üretimi için en uygun materyaldir [3]. AlGaIn'ın yüksek taşıyıcı mobiliteye sahip oluşu, yüksek sıcaklığa ve radyasyona olan direnci UV fotodedektörlerin ekstra koşullarda çalışmasını mümkün kılar. Özellikle AlGaIn fotodedektörler Al mol kesrinin % 40'ın üzerinde olması durumunda esnek dalga boylu, UV dalgaları ayıran özelliğı ile harikulade iyi tepki gösterirler [4,5]. Al_xGa_{1-x}N fotodedektörlerin hassasiyeti Al katkısının artırılması ile (x>0,38) 360 nm'den 200 nm'ye ayarlanabilir. Bu durumda AlGaIn doğal olarak güneş körü olur [6]. Son yıllarda, bu tip algılayıcılara olan ilgi dikkat çekici boyutlara vardı. Gerek sivil gerekse askeri uygulamalarda motor/makina kontrolü, güneşten gelen morötesi yayımın gözlenmesi, kaynak kalibrasyonu, morötesi astronomi, alev algılama, füze tespiti (füzenin geride bıraktığı duman vb. yoluyla) ve uzayda güvenli haberleşme amaçlı olarak bu tip ışık algılayıcılara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle bu uygulamalarda yüksek duyarlılık, yüksek algılama gücü ve yüksek performanslı güneş körü fotodedektörlerin seçilmesi çok önemlidir. Son zamanlarda Schottky-bariyer FD'ler, metal-yarıiletken-metal (MYM) FD'ler, p-i-n FD'ler gibi çeşitli nitrür temelli UV FD'ler geliştirilmiştir. Schottky-bariyer FD'ler, diğer FD'lerle karşılaştırıldığında hem üretimi daha kolay hem de cevap hızları daha yüksektir [7,8].

Kaliteli Fotodedektörlerin üretimi materyal kalitesinin iyileştirilmesi ile doğrudan ilişkilidir. Yüksek tavlama sıcaklığı böyle materyallerin oluşmasında önemli bir adımdır. Tavlama işlemi kristal kusurları (boşluklar, yanlış yerleşme) azaltmak ve hatta yok etmek için kullanılır.

Tavlama ile ilgili son zamanlarda yapılan çalışmalarda, örneğin, Zolper ve arkadaşları [9] GaN'ı Ar ve N₂ ortamlarında 1100 °C'ye tavlamışlardır. Özellikle N₂ ortamında AFM tarafından tanımlanan yüzey pürüzlülük değerinin (rms); tavlama öncesi 3.9 nm olduğunu ve tavlama sonrasında 1.1 nm'ye kadar düştüğünü gözlemlemişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü tavlama sıcaklığına bağlı olarak giderek azalmıştır. Ayrıca, büyütülmüş malzeme ve Argon (Ar), Azot (N) ortamında tavllanmış örnekler PL ile tanımlanmıştır. GaN örneğinin PL şiddetinin enerjiye göre grafiği ise Şekil 4.8'de verilmiştir. Bu grafikte hem Ar hem de N₂ ortamında 1100 °C de tavlanan GaN filmlerin PL şiddetinin tavlama işlemi öncesiyle karşılaştırıldığında arttığı görülmektedir. GaN'ün yasak enerji aralığı 3,476 eV tur. Bu enerjiye karşılık gelen ışımaya şiddetleri karşılaştırıldığında N₂ ortamında tavlama sonrasında PL şiddeti tavlama öncesine göre 4 kat, Ar ortamında tavlama sonrasında ise tavlama öncesine göre 2 kat arttığını gözlemlemişlerdir. Bunun da numunenin kalitesini artırdığı anlaşılmıştır [9].

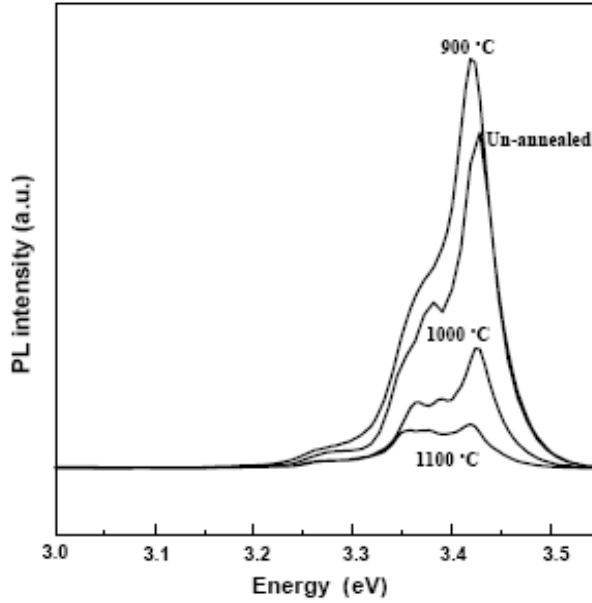


Şekil 1.1. Zolper ve arkadaşları çalışmalarında GaN 'ün 15 K de 325 nm dalga boylu He-Cd lazer kaynağı kullanmışlardır. a) Ar ortamında 1100 °C tavlama sonrası PL spektrumu b) N₂ ortamında 1100 °C tavlama sonrası PL spektrumu c) Tavlama işlemi öncesi örnek PL spektrumu [46].

Diğer bir çalışmada ise MOCVD ile büyütülmüş Er iyonları eklenmiş Al_{0,26}Ga_{0,74}N/GaN süper örgüler 700-1100 °C'de, Argon (Ar) içerisinde 4 dakika tavllanmış ve yapısal özellikleri araştırılmıştır. Sonuçlar yapılarıdaki kusurların azalması nedeni ile FL ışınım yoğunluğunun arttığını göstermiştir [10].

Hassan Z. ve arkadaşları, Nikel (Ni) Schottky kontaklı MYM fotodetektör temelli GaN'ı üretmişlerdir. 400-700 °C arasındaki farklı tavlama sıcaklıklarında kontaktları ısıtılardan geçirerek araştırmışlardır. Cihazların elektriksel özellikleri üzerindeki ısıtılardan etkilerini görebilmek için ısıtılardan sonra Cryogenic soğutma yapmışlardır. Elektriksel özellikleri akım-voltaj ve yüzeysel özellikleri Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ölçümüyle incelemişlerdir. AFM verileri fotodiyotların metal kontaktlarının düz yüzey özelliklerine ulaşılmasını tavlama artı soğutma işleminin yönlendirdiğini göstermiştir. Bu çalışmada tavlama artı soğutma işlemleri altındaki tüm örnekler sadece tavlama yapılan örneklere göre daha düşük rms yüzey pürüzlülüğüne sahip olduklarını görmüşlerdir. Bu da daha iyi yüzey morfolojisi anlamına gelmektedir [11].

Başka bir çalışmada Kumar ve arkadaşları, PL ve SEM analizini kullanarak GaN katmanlarının ısıtılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmalarında GaN katmanlarını 1000 °C sıcaklığa kadar Nitrojen içinde tavlamışlardır. 900 °C'ye kadar tavlama işleminin PL şiddetini arttırdığını gözlemlemişlerdir. Genellikle PL şiddeti (yoğunluğu) film yüzeyine ve film/altaş ara yüzeylerindeki yüzey tekrar birleşme hızına ve taşıma difüzyon uzunluğuna duyarlıdır. Bu yüzden 900 °C'ye kadar bant kenarı ışınım yoğunluğundaki artış GaN katmanlarının tavlama ile yüzey kalitesindeki iyileşmeden dolayı olabilir. Aynı zamanda PL yoğunluğunda 1000 °C'den sonra ciddi bozulmalar oluşmuştur. Bu da GaN katman yüzeylerindeki yüksek sıcaklıklardaki tavlamalarda oluşan büyük zararlara bağlanabilir. PL sinyallerindeki düşüşün sorumlusu olduğuna atfedilmiştir [12].



Şekil 1.2. Kumar ve arkadaşlarının çalışmasında MOCVD ile büyütülmüş GaN epitaksiyel katmanlarının tavlama öncesi ve sonrasında oda sıcaklığındaki PL spektrumu [12]

Rajasingam ve arkadaşları, Raman Spektroskopi'yi kullanarak, farklı koşullarda ve farklı sıcaklıklarda tavlamanın $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ içindeki stres üzerindeki etkisi araştırılmıştır. MOCVD ve MBE ile büyütülmüş düşük ($x=0,08$) ve yüksek ($x=0,31$ ve $x=0,34$) bileşenlerini karşılaştırmışlardır. Bileşenler ve yüzeysel değişiklikleri Auger Elektron Spektroskobu (AES) ve AFM kullanarak incelenmiştir. Örnek yüzeylerinin yanında hava ortamında tavlanan etkilerinin dikkat çekici olduğu gösterilmiştir. Kumar'ın çalışmalarına göre örneklerin bozulması hava ortamında $1100\text{ }^\circ\text{C}$ 'de olurken, Nitrojen ortamında $1200\text{ }^\circ\text{C}$ 'de olmaktadır [13].

Safir üzerindeki GaN katmanlarını MOVPE (Metal Organic Vapor Phase Epitaxy) süresince çekirdek katmanlarının birikimi ve tavlama süreçlerini Schmidtling ve arkadaşları, SEM (Scanning Electron Microscope) ve AFM teknikleri kullanarak incelemiştir. Sonuçta, $1060\text{ }^\circ\text{C}$ yükseklikteki sıcaklıklarda amonyak ve nitrojen gazlarının yüzey kararlılığına rağmen çekirdek katmanında yavaş bozulmaların olduğunu tespit etmişlerdir [14].

Yapılan diğerk çalışmalarda Ham Sung Ho ve arkadaşları, safir alttaşlar üzerinde MOCVD ile büyütölmüş AlGaN ince film yüzeyi üzerinde Schottky tip fotodiyotları üretmişlerdir. Üretilen cihazların her birinin elektriksel ve optik özelliklerini ölçmüşler ve cihaz similasyon sonuçlarıyla karşılaştırarak analiz etmişlerdir. Tasarlanan üç farklı katman yapıları için yapılan deneylerden elde edilen verilerden ikisinin hesaplanan değerler ile örtüştüğünü söylemektedirler [15].

Cheal Ro Lee ve arkadaşları ise, güneş körü metal-yarıiletken-metal (MYM) ile safir üzerinde büyütölmüş $Al_{0,3}Ga_{0,7}N/GaN$ heteroyapısı üzerinde üretilmiş UV fotodedektörlerini araştırmışlardır. Yüksek sıcaklıklı $Al_{0,3}Ga_{0,7}N/GaN$ katmanları içerisindeki AlN iç katmanlarının kullanımını ve bunun büyütölmüş yapılardaki etkilerini keşfetmişlerdir. MYM fotodedektör bazlı $Al_{0,3}Ga_{0,7}N$ başarılı bir şekilde üretilmiş ve incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar güneş körü MYM UV fotodedektörlerin kullanımının artması için oldukça ümit verici olmuştur [16].

Tamulaitis ve arkadaşları da çalışmalarında, AFM ve PL tekniği kullanarak AlGaN katmanlarını incelemişlerdir. $Al_xGa_{1-x}N/Al_yGa_{1-y}N$ çoklu kuantum epitaksiyel katmanları AlN kristal alttaşı üzerinde MOCVD ile büyütmüşlerdir. Taranan alan $5\mu m \times 5\mu m$ 'dir. Yüzey morfolojisi basamak (step) tipi morfolojidir ve yüzey pürüzlölük değerinin (RMS) 7 \AA civarında olduğunu tespit etmişlerdir [17].

Bu tez çalışmasında MOCVD ile büyütölen $Al_{0,52}Ga_{0,48}N$ Schottky FD yapının tavlama sıcaklığına ($800-960 \text{ }^{\circ}C$) bağlı olarak morfolojiksel ve optiksel özelliklerinin değişimi AFM ve PL teknikleri ile incelendi. AFM ölçümlerinden, yüzey pürüzlölüğünün tavlama sıcaklığına bağlı olarak önemli ölçüde düştüğü gözlendi. PL ölçümlerinden tavlama sıcaklığı ile PL piklerinin şiddetinin arttığı bulundu.

Tezin ilk bölümünde yarıiletkenler ve AlGaN fotodedektörü hakkında genel bilgi sunulduktan sonra bu konuda önceden yapılmış çalışmalara yer verildi. İkinci bölümde fotodedektör, üçüncü bölümde kristal büyütme teknikleri, ısıtma ve karakterizasyon teknikleri, yüzey kimyasal bileşimleri ve optiksel teknik hakkında

bilgi verildi. Dördüncü bölümde deneysel bulgular ve tartışma anlatılmıştır. Son bölümde ise sonuç ve öneriler yer almıştır.

2. FOTODEDEKTÖRLER (FOTOALICILAR)

Optoelektronikte önemli olan fotodedektörler vericiden gelen ışığı elektriksel sinyale çevirirler. En önemli parametreleri spektrum duyarlılık ve hızdır. Fotodedektörlerin bağlantı şemasına göre üç çalışma yöntemi vardır.

a) *Belirli bir sabit ışın şiddeti; Zaman içinde seviyesini değiştirmeyen ve fotodedektörün çıkışında elde edilen akım veya gerilim seviyesi sabittir.*

b) *Işık şiddetinin zamanla değişimi; Fotodedektörün duyarlı yüzeyine odaklanmış ışın şiddeti modüle edilmiştir. Modülasyon tipi duruma göre seçilir. Fotodedektörün çıkışında elde edilen akım veya gerilim seviyesi de ışına göre değişir.*

c) *Işık şiddetinin belirli bir zaman içinde değişimi; Bu yöntem anahtar yönetimi denir [18].*

Optik dedektörler ısı ve foton dedektörler olarak sınıflandırılır. Isıl dedektörlerde ışığın soğurulması aygıtın sıcaklığını yükseltir. Bunun sonucunda sıcaklığa bağlı parametrelerde bazı değişimler gözlenir. Bu değişime örnek olarak elektriksel iletkenlik verilebilir. Isıl dedektörlerin çıkışı genelde, dedektör tarafından birim zamanda soğurulan enerji miktarıyla orantılıdır. Eğer soğurma veriminin bütün dalga boylarında eşit olduğu kabul edilirse, ışığın dalga boyundan bağımsızdır. Ancak foton dedektörlerinde soğurma işlemi bir dizi kuantum olayıyla gerçekleşir. Bu yüzden foton dedektörlerinin çıkışı, ışık taneciklerinin soğurulma oranıyla doğrudan ilişkilidir. Ayrıca burada ele alınan bütün foton işlemleri kendilerini başlatacak belirli bir minimum foton enerjisine ihtiyaç duyarlar. Bir tek foton için enerji $E = h\nu/\lambda$ eşitliği ile verilir [19].

Kızıl ötesinde çalışan foton dedektörlerinde en çok karşılaşılan sorun, soğurulan foton enerjilerinin, dedektörün kendisinde bulunan atomların ortalama ısı enerjileriyle karşılaştırılabilir hale gelmesidir. Bunun sonucunda meydana gelen elektron salınımları ışığın soğurulmasının yanında, ısı uyarmayla da üretilir. Böylece bir gürültü kaynağı meydana gelir. Bu gürültü sinyalinin azaltılması için dedektörün sıcaklığı azaltılmalıdır [19]. İyi bir dedektörde istenilen performans şartları, düşük gürültü, yüksek güvenilirlik, yüksek duyarlılık, büyük bant genişliği ve düşük maliyettir.

Isıl dedektörler optoelektronikte az öneme sahiptirler. Sadece daha çok bilinen Termoelektrik dedektörler, Pnömatik dedektörler ve Payroelektrik dedektörlerle ilgili kısa bilgi verilecektir.

Termoelektrik dedektörler, termoçift prensibi kullanır. Burada, farklı iki metal arasında bir eklem ısıtılması ile devre etrafında bir akım oluşturulur. Bu akım sıcaklık farkıyla orantılıdır. Bu dedektörlerde bir eleman oda sıcaklığında tutulurken diğer eklem alıcı sıcaklık artışını algılamada kullanılır. Daha hassas dedektörlerin oluşumunu sağlamak için termoçiftlerin seri bağlanması gerekir. Bu aygıt termik yığın olarak bilinir. Diğer bir etkin çalışma, ısınma etkisini küçültmek için yüksek iletkenliğe sahip maddeler ile elde edilebilir. Aynı çalışma ısı iletim kayıplarını azaltmak için küçük ısı iletkenliğe sahip maddelerle de sağlanabilir. Ancak bu iki işlem aynı zamanda yapılamaz. Çünkü aralarında bir uyuşma sağlanmalıdır. Daha iyi duyarlılık için zenginleştirilmiş yarıiletkenler kullanılmalıdır. Yapılarının dayanıklı olması ve kullanım basitliğinden dolayı termo dedektörler genelde tercih edilmektedir [19].

Pnömatik dedektörler, hava basıncı ile işler. Alıcı eleman havası sıkıştırılmış bir odacığa yerleştirilir. Bu elemana gönderilen radyasyon odacığın içindeki sıcaklığın yükselmesini, dolayısıyla hava basıncının artmasını sağlar. Bu basınç artışı duyarlı dedektörlerle ölçülür. Golay Hücresi bu dedektörlerden birisidir [19].

Payroelektrik dedektörler, Golay Hücrelerinde olduğu kadar duyarlı değildir. Ancak dayanıklı ve çok hızlı cevap zamanına sahiptirler. Gönderilen radyasyon ferroelektrik maddede soğurular. Bu madde sürekli bir dipol momentine sahip molekül içermelidir. Payroelektrik dedektörlerde yükleme dirençlerinin büyük olması nedeniyle dedektör içine bir direnç çakıştırıcı devre konulmalıdır. Bu dedektörler nanosaniye mertebesinde cevap zamanlıdır. Ayrıca 10 μm 'e kadar uzanan dalga boyuna cevap verebilirler. Maliyetlerinin ucuz olmasından dolayı yangın alarmı gibi uyarıcılarda kızılötesi dedektör olarak kullanılırlar [19].

Fotodedektör olarak ise genellikle fotoiletkenler, fotodirençler, fototristörler, fototriyaklar ve fotodiyotlar kullanılır.

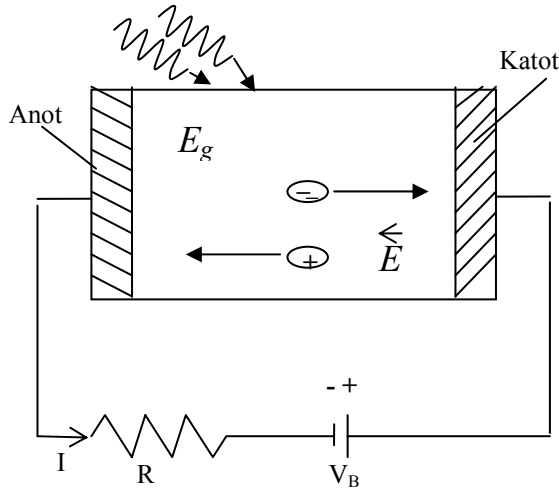
Fotoiletkenler; ışık radyasyonu ile elektronların iletim bandına uyarılmasından dolayı bir akım oluşturmalarıdır. Eğer elektronlar ve delikler p-n eklem bölgesinde oluşursa elektrik alanı tarafından ayrılırlar ve akım oluştururlar [20]. Fazlalık elektronlar ve boşluklar (holes) yarıiletken içerisinde yaratıldığı zaman malzemenin iletkenliğinde artış olur. İletkenlikteki bu artış fotoiletkenin temelidir. Belkide en basit fotodedektör şeklidir.

Fotodirençler, ışın şiddeti ile dirençleri (iletkenlikleri) değişen devre elemanlarıdır. Bir yarıiletken fotodirencin üzerine bir ışık düşerse ışığın seviyesine göre fotodirencin iletkenliği değişir [21]. Fotodirençlerin önemli özellikleri; çok geniş duyarlılığa sahip olması, çok büyük zaman sabitine sahip olması ve ısıya olan duyarlılığıdır [18].

Tristör'ler mantık olarak iki transistör'ün birbirine bağlandığı gibidir. *Triyak*'larda tristörlerin alternatif akımda çalışabilen türleridir. Triyak'ın oluşumunda birbirine ters yönde bağlı iki adet tristör bulunur.

Fotodiyot, aydınlatıldığında akım akıtan bir yarıiletken diyot türüdür [22]. İki elektriksel temasa (anot ve katot'a) sahip yarıiletken oluşur. Şekil 2.1 temel fotodiyot işleminin özetidir. Fotonun enerjisi yarıiletkenin band aralığı enerjisinden yüksek ($h\nu > E_g$) ise foton soğurulur. Başarılı soğurma süreci serbest elektron-hole çiftinin üretimi ile sonuçlanır. Anottan daha düşük potansiyele sahip olmasını sağlayan ters besleme voltajı eğer uygulanırsa, yarıiletken boyunca elektriksel alan meydana gelir. Elektriksel alan altında anot ve katot çevresinde foto taşıyıcılar toplanır. Artı anot ve eksi katot da toplanır. Bu iletim süreci dış devre içinde elektrik akımına neden olur. Bu akıma da fotoakımı denir. Sonuç olarak 3 adımda açıklayabiliriz.

- yarıiletken içinde fotonun soğurulması ve taşıyıcıların üretimi
- bölgesel elektrik alan altında taşıyıcıların toplanması
- alet kontaklarında (anot ve katot da) taşıyıcıların toplanmasıdır [2].



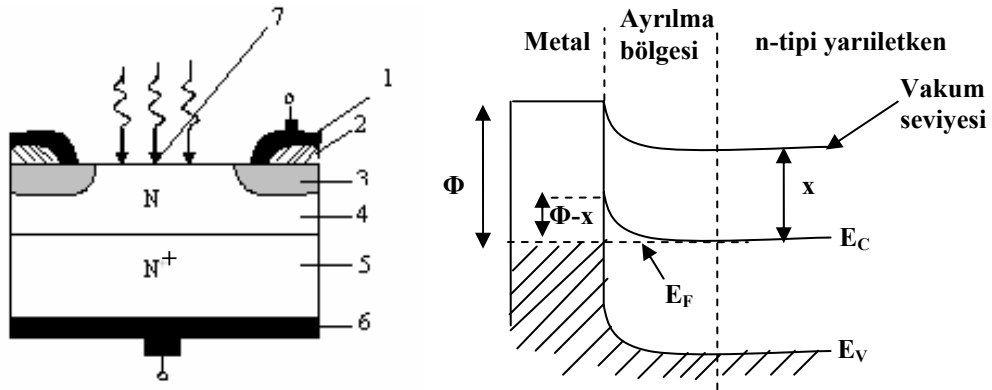
Şekil 2.1. Fotodiyot'daki algılama olayının şematik gösterilmesi.

Fotodiyot'ların en önemli avantajları yüksek hızlarıdır. Çoğunun tepki süresi 200 ns'nin altındadır. Bu yüksek hız, fotodiyotların yüksek hızlı devrelerle birlikte kullanılabilmelerini sağlar. Yüksek hızlı teyp okuyucularında sıkça kullanılırlar. Fotodiyotlar, kontak tipine ve diyot yapısına bağlı olarak Schottky (bariyer)

fotodiyodu, metal-yarıiletken-metal fotodiyodu, p-i-n fotodiyodu, çığ fotodiyodu vb. sınıflandırılırlar.

Schottky fotodiyodu, normal diyotlar çok yüksek frekanslarda üzerine uygulanan gerilimin yön değiştirmesine karşılık vermezler. Yani iletken durumdan yalıtkan duruma veya yalıtkan durumdan iletken duruma geçemezler. Bu hızlı değişimlere cevap verebilmesi için Schottky diyotlar imal edilmiştir ve iki değişik metal-yarıiletken kontaklardan oluşmuştur. Bunlar omik kontak ve Schottky kontak. Omik kontak düşük dirençli kesişimdir ve her iki yönde akım iletir. Schottky eklemi potansiyel bariyer oluşturur. Yarıiletken boyunca tüketilmiş bölge yaratır. Bu davranış tek yönlü p-n eklemine çok benzerdir [2].

Bir Schottky fotodiyodunda ince bir metal kaplama (genelde altın) bir n-tipi silikon tabana konur. Şekil 2.2.a'da Schottky fotodiyodun yapısı, Şekil 2.2.b'de ise eklem bölgesindeki enerji bant yapısı gösterilmiştir [21]. Buradan ayrılma bölgesi içinde elektron-delik çifti üretildiğinde, elektron ve holün bir p-n eklem fotodiyodunda olduğu gibi iç alanın etkisiyle ayrılacağı görülebilir.



Şekil 2.2 a) Schottky fotodiyodun yapısı 1- Kontak 2- SiO₂ tabakası 3- Yarı izole edilmiş bölge 4- N bölge 5- Katkı yoğunluğu fazla olan bölge 6- Taban kontak 7-İnce altın kaplamalı saydam bölge b) Eklem bölgesinde enerji seviyesinin davranışı ($\phi-\chi$) kadar bir potansiyel engel metal ve yarıiletken arasında oluşur.

Schottky fotodiyodu'nun temel üstünlüğü, yüzey metal tabakanın mavi ve yakın morötesi radyasyonunu geçirecek kadar ince yapılabilir olması ve böylece bu bölgede artan bir duyarlığın elde edilmesini sağlamasıdır [19].

p-i-n fotodiyodu, $p^+ - i - n^+$ yapıya sahip diyotlardır. p^+ ve n^+ bölgelerinin katkı maddesi oranları yüksek ve i bölgesi büyük dirençlidir. Alçak frekanslarda diyot bir p-n doğrultucu gibi çalışır. Frekans yükseldikçe i bölgesi de etkinliğini gösterir. Yüksek frekanslarda i bölgesinin doğru yöndeki direnci küçük, ters yöndeki direnci ise büyüktür. Diyot'un direnci uygulama yerine göre iki limit arasında sürekli olarak veya kademeli olarak değiştirilebilmektedir. p-i-n diyotlar değişken dirençli eleman olarak, mikrodalga devrelerinde, zayıflatıcı, faz kaydırıcı, modülatör, anahtar gibi çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır [22].

Çığ fotodiyodu, Yapımında ana elemanlar olarak Silikon ve Galyum arsenik (GaAs) kullanılır. Diyot içerisindeki P+ ve N+ tipi kristaller, içerisindeki katkı maddeleri normal haldekinden çok daha fazla olan P, N kristalleridir [22]. Hızlı fotodiyotların çoğu 50 Ω 'luk bir yükleme direnciyle birlikte kullanılacak şekilde tasarlanır ve çıkış gerilimi çoğunlukla bir miktar yükseltilmeye ihtiyaç duyar. Fotoakımın faydalı iç yükseltimi çığ fotodiyodunda başarılıdır. Bu aygıtta, temel bir p-n yapısı çok yüksek ters gerilim altında çalıştırılır. Böylece ayrılma bölgesini geçen taşıyıcılar, çarpışma uyarması yoluyla enerji aralığı boyunca daha başka taşıyıcıların uyarılabilmesine izin verebilecek yeterli enerjiyi kazanırlar. Çığ fotodiyodu kullanıldığında bazı önlemler alınmalıdır. Mesela dengeleme gerilimiyle kazancın hızlı değişimi, sabit kazancın elde edilmesi isteniyorsa kararlı bir güç kaynağının kullanılmasını gerektirir [19].

3. DENEYSEL TEKNİKLER

Cihaz performansı yapının kalitesiyle yakından ilişkilidir. Bu nedenle büyütülen örneklerin özelliklerini etkileyen kusurların ve yapısal elemanların incelenmesi gerekir. Bu incelemeler;

- 1- Özellikler ve yapı arasındaki ilişkilerin anlaşılabilmesi,
 - 2- Malzemenin kapasitesinin tahmin edilebilmesi,
- açısından oldukça önemlidir.

Bazı yapısal elemanlar makroskopik boyutlardadır. Yani, çıplak gözle görülebilecek kadar büyüktür. Örneğin büyüklük ve şekil özellikleri gibi. Fakat çoğu malzeme, içindeki bileşiği meydana getiren tanecikler mikroskopik boyutlardadır. Bunların çapları mikron düzeyinde olabilir ve detaylarının araştırılması için çeşitli mikroskoplar kullanılmak zorunda kalınabilir [23]. 1980'lerden beri yüzey çalışmaları için bir kaç deneysel teknik geliştirilmiştir. Yapısal bilgi elde etmek için kullanılan teknikler başlıca iki ana grup altında toplamak mümkündür:

a) Yeniden yapılanma modeli: Düşük Enerjili Elektron Kırınımı (Low Energy Electron Diffraction: LEED), Yansımali Yüksek Enerjili Elektron Kırınımı (Reflection High Energy Electron Diffraction: RHEED), Taramalı Tünelleme Mikroskobu (Scanning Tunneling Microscope: STM)

b) Atomik bilgiler: LEED, STM, Duran Dalgali X-ışınları (X-ray Standing wave: XSW), Fotoelektron Kırınımı (Photoelectron diffraction: PhD) teknikleri kullanılmaktadır. Yüzey elektronik seviyeleri ise Fotoyayım Spektroskopisi (Photoemission spectroscopy: PS) ve türevleri olan Ultraviyole PS (UPS), X-ışınları PS (XPS) yardımı ile elde edilebilir. Aynı zamanda STM tekniği yüzey elektronik seviyeleri araştırmak içinde kullanılmaktadır. Enerji bantlarının dağılımı Açık Kararlı

U.V. Fotoelektron Spektroskopisi (Angle-Resolved Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy: ARUPS) kullanılarak elde edilir. Bu bölümlerin yoğunluğu Açı Entegreli Fotoemiyon Spektrumu kullanılarak ölçülebilir. Yüzey kimyasal bileşimleri ise Auger Elektron Spektroskopisi yardımı ile de bulunabilir (AES)[24]. Optik ve elektron mikroskoplarının her ikisinde genel olarak mikroskobide kullanılır. Bu cihazlar tüm malzeme tiplerinin mikro yapısal özelliklerinin incelenmesine yardımcı olurlar [23].

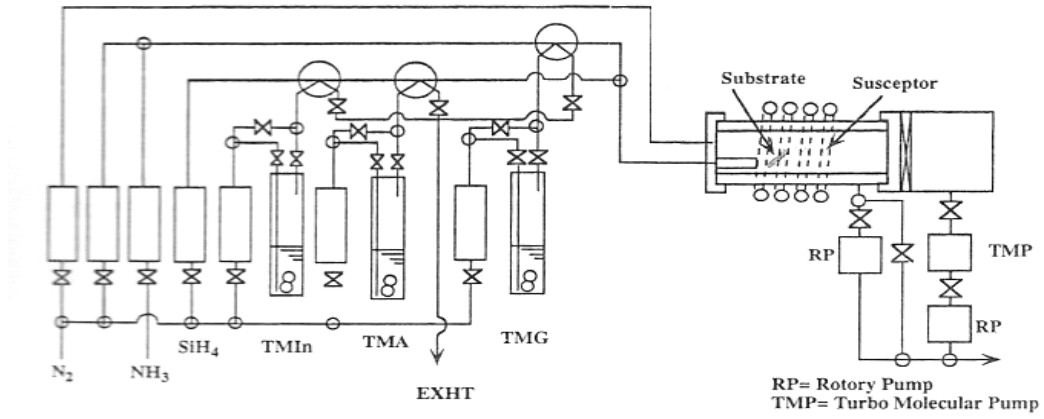
Bu tez kapsamında her bir tekniğin anlatılması mümkün değildir. Bu nedenle bu bölümde önce yüksek kristal kalite sahip epitaxial filmlerin büyütülmesinde yaygın olarak kullanılan MOCVD ve MBE teknikleri anlatılacak ardından da tavlama işleminden bahsedilecektir. Son olarak tavlama işleminin örneklerin yapısal, morfolojiksel, kimyasal ve optiksel özelliklerine etkilerini belirlemede kullanılan karakterizasyon teknikleri detaylı olarak anlatılacaktır.

3.1 Kristal Büyütme Teknikleri

3.1.1 Metal organik kimyasal buhar birikimi (MOCVD- Metal organic chemical vapour deposition)

Maruska ve Tietjen yaklaşımı [25] günümüz OMVPE AlN ile de ayrışma yeteneğine sahip GaN büyütme reaktörünün önceden haber veren bir yaklaşımıdır [26].OMVPE veya Metal Organik Kimyasal Buhar Birikimi (MOCVD) ve TriMetilGalyum (TMG), TriMetilAlimünyum (TMA) ve TriMetilİndiyum (TMI) yaklaşık olarak 1000 °C'ye kadar ısıtılan alttaş'taki (substrate) NH₃ ile reaksiyona girer. Atmosferik basınç reaktörünün şematik gösterimi Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Bu reaktör düşük basınç yeteneğine sahiptir ve Akasaki'nin laboratuvarında kullanılmıştır. Tüm reaktörlerin ortak özelliği şudur ki; reaksiyona giren maddeler sadece alttaş'ın yüzeyi üzerindkilerle ilişkiye girmek zorundadırlar. Birbirlerini etkilemeden önce özellikle Al ve Amonyak gaz fazında büyümeyi zorlaştıracak ters etki oluşumuna sebep olur. Nakamura [27] oldukça başarılı olan nitrit büyütmesine özel atmosferik basınçlı MOVPE reaktörünü tasarladılar. H₂ ile karıştırılmış reaksiyona giren gazlar dönen

altaş üzerindeki akışı idare eden quartz körükten geçerek büyütme alanına girerler. Bu tasarımın başlıca özelliği reaksiyon giren gazların altaş'la olan etkileşimini geliştirdiği iddia edilen H_2 ve N_2 'nin aşağıya doğru olan akışıdır. Grup III nitrit büyümesi için MOCVD reaktörleri yüksek çalışma basıncındaki düzenli akışı kapsar ve ön çökme reaksiyonlarını azaltmak için nitrit ve amonyak için ayrı girişleri belirtir. Nichia reaktöründe ana akış altaş'a paralel olarak reaksiyona giren gazları taşır. İkinci yan akış altaş kuvvetlerine diktir. Diğer yandan reaksiyona giren gazlar altaş tarafına doğrudur ve ısı yalıtımını önler. Dönen alıcı çöktürülmüş filmlerin homojenliğini korumak için kullanılır. Ticari sistemler dikey tip olma eğilimindedir ve diğerleri atmosferik basınçta çalışırlar [28].



Şekil 3.1. Atmosferik basınç reaktörünün şematik gösterimi

MOVPE büyütmesi gaz çıkarma altaş dizisini takip eder. İlk olarak yüksek sıcaklık tavlaması ve daha sonra düşük sıcaklık AlN veya GaN tampon tabakası, son olarak da MOVPE büyütmesi yapılır. Daha sonra büyütme durdurulur ve altaş sıcaklığı amonyak akışı altında ana büyütme sıcaklığına yükseltilir ve istikrarlı hale getirilir. Büyütme işlemi ana GaN katmanlarını oluşturmak için tekrar başlatılır [28].

MBE veya MOCVD metotlarını ilk kullananların karşılaştığı en büyük zorluk, safir ve GaN arasındaki örgü uyumsuzluğu nedeni ile yüksek kaliteli katman'ların nasıl büyütüleceğiydi. AlN veya GaN tampon katmanlarının buluşuyla önemli bir aşama

kaydedildi [29]. GaN epitaxial büyümesinden önce tampon katmanlarının çöktürülmesi stratejisi Akasaki [30] tarafından kullanıldı.

3.1.2 Moleküler demet epitaksi (MBE- Molecular beam epitaxy)

Epitaksi işlemi; tek bir cins veya farklı cins malzemelerden yapılmış ince filmleri benzer yapıdaki kristallerden oluşturulan temel bir tabaka üzerine yerleştirebilme tekniğidir. Moleküler demet epitaksi ile teknolojinin en üst noktasına ulaşılmıştır. Örneğin Galyum arsenik tek kristali alt tabaka olarak kullanılır ve bunun üzerine alüminyum ve alüminyum arsenik alaşımları büyütülür. Galyum, alüminyum ve arsenik havası boşaltılmış bir odacıkta buharlaştırılıp, galyum arsenik tabaka üzerine demetler halinde gönderilir. Demetler kalınlığı kontrol edilebilen düzgün katmanlar halinde temel tabaka (alttaş) üzerinde birikirler. Buhar halindeki demetler yüzey üzerinde saniyede bir katman oluşturabilirler. Alt tabaka üzerine biriktirilen katmanların bileşimleri, farklı buhar demetlerini farklı oranlarda yüzeye yönlendirerek kontrol edilir. Katkı atomları, katmanların oluşum sürecinde istenilen miktarlarda ilave edilir.

MBE Tekniği; yarıiletken üretme tekniklerinin en önemlilerindedir. Ultra yüksek vakum (UHV) şartları altında bir kristal yüzey ile atom yada moleküllerin bir veya daha fazla ısıl demetlerinin reaksiyonunu içeren bir epitaksiyel büyütme sürecidir. Moleküler demet, kaynak elementin buharlaşacak düzeye kadar ısıtılması ile elde edilir. Yüksek-kalitede saf ince film üretebilmek için kaynak element mümkün olduğunca saf olmalı ve büyütme işlemi çok yüksek basınç (UHV) ortamında gerçekleştirilmelidir. MBE’de büyütme oranı saniyede birkaç angstrom mertebesindedir.

3.2. Isıtma Tekniği

3.2.1. Isısal tavlama sistemi (Thermal annealing)

Yüksek sıcaklıklarda metallerin ve alaşımların içinde bir takım olaylar, örneğin tekrar kristalleşme ve ayrışmalar meydana gelir. Bunlar, uygun ısıl işlemler uygulandığında mekanik özelliklerin değiştirilmesinde etkilidir. Aslında ticari alaşımların üzerinde ısıl işlem uygulanması oldukça yaygın bir uygulamadır. Bu işlemlerden bazıları şunlardır; tavlama (annealing) işlemleri, ısıl işlemler ve hızlandırılmış sertleştirmedir [23]. Genellikle tavlama işlemi şunun için yapılır:

- * Malzemeyi daha önceki işlemlerde yüklenen örneğin haddeleme ve dövme işlemi ile iç streslerden arındırmak için,
- * Malzemeyi yumuşatmak ve işlenebilirliğini artırmak için,
- * Malzemeyi büyük tanelerden arındırarak özel mikro seviyede yapıyı üretmek için yapılır.

Farklı tiplerde tavlama işlemleri mümkündür; çoğu zaman mikro yapısal ve mekanik özellik değişikliklerine göre tanımlanırlar. Tavlama sıcaklık, soğutma hızı ve prosesin özel detaylarına, kullanılacak malzemeye ve işlemin amacına bağlı olarak karar verilir [31]. Herhangi bir tavlama işlemi üç kısımdan oluşur:

- 1- İstenilen sıcaklığa ısıtma,
- 2- Bu sıcaklıkta gerekli değişiklikler oluncaya kadar tutma,
- 3- Soğutma (genellikle oda sıcaklığına)

Bu işlemler için zaman önemli bir parametredir. Isıtma ve soğutma süresince malzemenin iç kısımları ve dışı arasında sıcaklık değişimleri mevcuttur. Bu değişimin büyüklüğü malzemenin şekline ve geometrisine bağlıdır. Eğer sıcaklık değişim hızı çok büyükse sıcaklık değişimleri ve iç stresler eğrilmelere ve hatta çatlaklara sebep olabilir. Ayrıca tavlama zamanı gerekli değişim reaksiyonlarına izin verecek kadar uzun olmalıdır. Tavlama sıcaklığı da önemlidir. Sıcaklığı artırarak tavlama hızlandırılabilir [23].

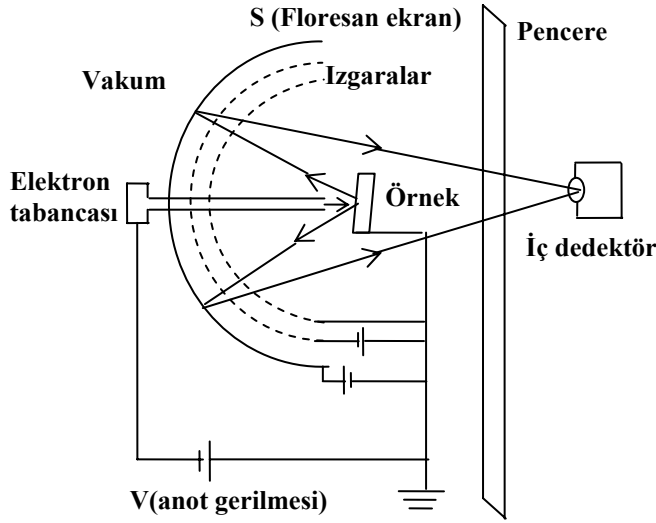
Isıtma ve soğutmanın hızı kontrol edilebilir istenmeyen reaksiyonlar (özellikle oksitlenme) yüksek sıcaklıklarda önemli olabilir. Eğer bu kabul edilemez ise tavlama vakum içinde veya gazı azaltılmış atmosfer içinde yapılır [31].

3.3. Yapısal Teknikler

Yüzey birim hücrelerinin büyüklüğü ve şekli LEED, RHEED ve STM modelleri kullanılarak elde edilebilir. Eğer kristal belirli bir yüzey boyunca kesilirse yüzey yakınındaki atomlar kendi denge pozisyonlarından sapabilirler. Bu yüzeyin ilgili pozisyonlarındaki ve yüzey atomlarının yakınındaki değişiklikleri yönlendirir. Böyle değişiklikler aşağıda anlatılan deney teknikleriyle keşfedilebilirler.

3.3.1. Düşük enerjili elektron kırınımı (Low energy electron diffraction: LEED)

LEED yüzey yapısına karar vermek için en güçlü metotlardan biridir. Bu teknikte elektronlar kristal içindeki iç nükleer aralıklarıyla karşılaştırılabilir dalga boyuna sahiptir [24,25,26,27]. Yani LEED elektronları çok düşük nüfus etme gücüne sahiptir. Eğer 1 Å civarında iç atomik boşluk (interatomic) elde etmek istiyorsak kinetik enerjisi 150 eV ($\lambda = h/mv = h / (2mE^{1/2})$) olan elektronlara ihtiyacımız vardır. Belirli Bragg Kırınım modeli elde etmek için bu örgü ile elektronlar ahenkli olarak dağıtılırlar. Bu kırınım modelinin şeklinden kristalin iki boyutlu periyodik yapısına karar verilebilir.



Şekil 3.2. LEED deneysel düzeneği

Elektron tabancası anot, veya ışın voltajı kullanılarak ivmelenmiş elektron ışını üretir. Anot'un onun içinde deliği vardır. Buda elektronların kaçmasına izin verir. Elektronlar ızgaradan (grid) içeri girer. İki yarı küresel ızgara arasında geciken potansiyel vardır. Bu elektronların ızgaradan geçmesini sağlar. Floresans ekran öyle yüksek pozitif potansiyelde tutulur ki elektronlar hızlanır ve ekranı harekete geçirir. Daha sonra kırınım spotunun görüntü modeli video kamera kullanılarak kaydedilir. Teknik düzensiz yüzeylerden kaynaklı LEED yoğunluk dağılımının yayılımın ölçecek kadar duyarlıdır.

3.3.2. Yansımali yüksek enerjili elektron kırınımı (Reflection high energy electron diffractrion: RHEED)

RHEED yüzey bilminde diğer önemli bir araçtır. Yüzeye oldukça duyarlıdır ve kristal yüzey hakkında, yüzey bilgisini çok hızlı bir şekilde sağlar. RHEED tekniği LEED ile benzerlikleri vardır. Her iki metotta da örnek, elektron ışınıyla vurulur ve yansıma modeli flüoresans ekranında görülür. Fakat RHEED elektronlar daha yüksek enerjiye (3-100 keV) sahiptir [32-35].

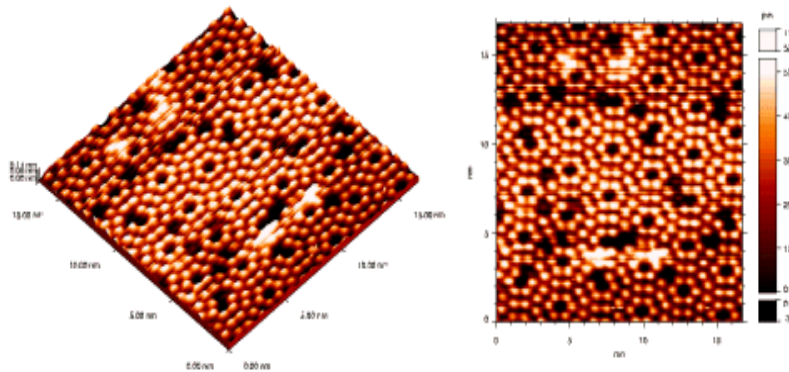
Yüksek enerji ışını, örnek yüzeye açılı olarak yöneltir. Elektronlar örneğin kristal yapısıyla yansılar ve elektron tabancasına ters yönde monte edilen fosfor ekranına

çarparlar. Sonuç modeli LEED deneyinde elde edilen beneğe karşılık çizgilerden oluşur. Bu çizgiler arasındaki uzaklık birim hücre büyüklüğündeki yüzey örgüsünü gösterir. Bu açı düşen elektronların yüksek enerjisine rağmen yüzeyin belirlenmesine olanak sağlar. Eğer yüzey atomik olarak düz ise keskin RHEED modeli görülür. Eğer yüzey daha pürüzlü bir yüzeye sahip ise RHEED modeli daha etkin olur. Malzeme yüzey üzerinde buharlaşırken RHEED osilasyonunu bu davranış yönlendirir. Yani RHEED moleküler demet büyütmesini (molecular beam epitaxy-MBE) kullanır. MBE altaşlar (substrate) üzerine atomik boyutlardaki malzeme katmanlarına yayma metodudur. Bu ultra vakum (UV.) şartlarındaki altaşların üzerine düşen malzemenin moleküler ışınını yaratarak yapılır.

3.3.3 Taramalı tünelleme mikroskobu (STM)

Taramalı Tünelleme Mikroskobu veya STM (The Scanning Tunneling Microscopy), Gerd Binnig, Heinrich Rohrer tarafından IBM Zürih laboratuvarlarında 1982 yılında icat edildi. Binnig ve Rohrer bu çalışmalarından dolayı ilk deneylerinden tam 4 yıl sonra 1986 yılında Fizik Nobel ödülüne layık görüldü [36-38].

İlk STM'ler laboratuvar aygıtı niteliğinde iken kısa zaman önce ticari STM'lerde hizmete sunuldu. Ticari aletlerin hizmete sunulmuş olması, taramalı tünelleme mikroskobunun çeşitli uygulamalarda kullanımını hızlandırdı.



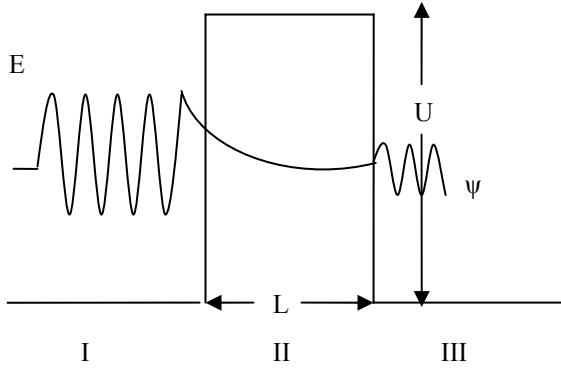
Şekil 3.3. Starlab laboratuvarında taramalı tünelleme mikroskobu ile fotoğrafı çekilmiş Si yüzeyi

Bu uygulamalar, elektro kimya için elektrotları karakterize etmeyi, yüzey dalgalanmalarını yani pürüzlerini karakterize etmeyi, optik süzgeçlerin niteliğini ölçmeyi ve hatta biyolojik yapıların taklitlerini görüntülemeyi içerirler [36]. STM deneysel tekniği özellikle doğrudan yüzey geometrisini, yapısını ve elektronik özelliğini ölçebilmektedir. STM sistemi ayrıca iğne türü algılayıcılarla AFM ölçümlerini değişik numune sıcaklıklarında yapabilmektedir.

STM sisteminde elektriksel olarak beslenen ince uçlu başlık, yüzeyi UHV şartlarında çok yakından tarar. UHV ortamı yabancı atomlar içermediği için yüzeyde bulunan boş bağlar farklı atomlarla bağ yapamayacak ve katı yüzeylerin yüzey bileşeni, UHV sayesinde, deney sırasında değişmeden kalacaktır.

STM, bir tek atomun boyutuyla karşılaştırılabilir ayırma gücü ile yüzeylerin görüntüsünü oluşturmak için tünelleme olayını kullanan önemli bir alettir [36]. Klasik fizik kurallarına göre, elektronların bir bölgeden diğerine geçişinin mümkün olmadığı hallerde, kuantum mekanik kurallarına göre bu geçiş tünelleme olayı ile mümkün olur. Taramalı Tünelleme Mikroskobunun çalışma prensibi kuantum-mekanik tünelleme olayına dayanır [39].

Tünelleme Fiziği: Bir parçacık, sonlu yükseklik ve genişliğe sahip bir engele çarptığı zaman çok ilginç ve garip bir olay meydana gelir. Klasik olarak bu durum sıfırdır. U yüksekliğinde ve L genişliğinde bir dikdörtgensel engel üzerine gelen E enerjili bir parçacık ele alalım. Burada $E < U$ olsun [36].

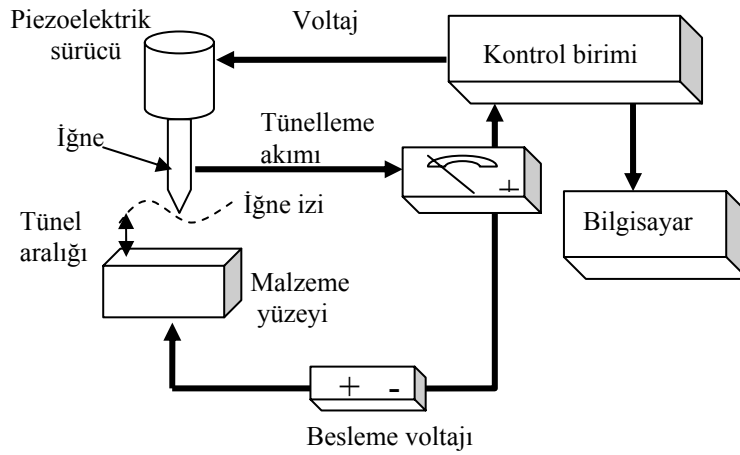


Şekil 3.4. Bir engelde tünelleme

Klasik bakışta parçacık engeli geçecek hatta engel içine girecek kadar yeterli enerjiye sahip olmadığı için engel tarafından geri yansıtılır. O halde, II ve III bölgeleri parçacık için yasak bölgelerdir. Bununla beraber kuantum mekaniğine göre bütün bölgeler, enerjisine bakılmaksızın, tanecik için kabul edilebilir bölgelerdir. Çünkü parçacığa bağlı madde dalgalarının genliği her yerde sıfır değildir. Yukarıdaki şekil, dalganın engelin içine girmesini ve ötesine geçmesini göstermektedir. Engelin solunda (I bölgesi) ve sağında (III bölgesi) dalga fonksiyonları sinüzoidaldir ve engel içinde (II bölgesi) üstel azalan bir fonksiyonla yumuşakça bağlanırlar. Parçacığın yerleşme olasılığı $|\Psi|^2$ ile orantılı olduğundan, engelin ötesinde, III bölgesinde parçacığın bulunma şansının sıfır olmadığı sonucuna varılır. Engelin öbür yanında parçacığın bulunma olasılığına *tünelleme* adı verilir. Parçacık engelin iç tarafında asla gözlenemese de (çünkü enerjinin korunumu ihlal olur), bu bölgeden geçebilir ve III bölgesinde gözlenebilir. Görüldüğü gibi tünelleme bir kuantum olayıdır ve maddenin dalga doğasının bir görüntüsüdür. Tünellenmenin çok önemli olduğu, atomik ve nükleer ölçekte doğada pek çok örnek vardır. Örneğin Taramalı Tünelleme Mikroskobu [36].

Eğer potansiyel basamağı sonlu ise (STM'deki uç (iğne) ve numune arasında olduğu gibi) kenardaki tek sınır koşulu dalga fonksiyonunun sabit olmasıdır. Kuyu içerisinde salınan dalga fonksiyonu, bariyer içersinde azalan bir üstel fonksiyon haline dönüşür. Aynı durum diğer kuyuda (numune kuyusu) da olur. Tünelleme olasılığı, bariyer içersindeki iki dalga fonksiyonunun minimum değerine bağlıdır [39].

Taramalı Tünelleme Mikroskopunun Çalışma Prensipleri: STM deneysel tekniği yüzey analizi için gerçekte çok iyi geliştirilmiş bir tekniktir [27]. Yüzey çalışmaları için çok güçlüdür. Çünkü direkt olarak yüzey geometrilerini, yapılarını ve elektronik özelliklerini belirlemektedir [40].



Şekil 3.5. STM'in çalışma prensibinin şematik gösterimi

Oldukça keskin sensör iğneleri bu dış alanlı yüzeye yakın olduklarında, örnek yüzeyden elektronlar, sensör iğnesi üzerinden, sensör iğnesi ve yüzey arasındaki tünele iletilirler. Bu tünelleme akımının büyüklüğü örnek ayırma iğnesine çok duyarlıdır. İğne ve örnek arasındaki küçük gerilim voltajı küçük elektrik akım meydana getirir. İki iletken ayrı olsa bile bu akım meydana gelir. Bu akan akım yüzeyin üzerindeki ve iğnenin sonundaki elektron orbitallerinin kenarlarında yükselir ve bu sebeple elektronlar ikisi arasındaki vakum bariyerleri boyunca tünelleme açar. Bu akım elektron orbitallerinin kenarları ile doğru orantılıdır. Çünkü bu atomların üzerindeki elektronlarının dalga fonksiyonlarının radyal bileşeninin karesi ile orantılı olmasından dolayı iğne yüzeyden uzaklaştıkça akım karesel olarak düşer. İğnenin yüzeyi ardışık olarak taramasıyla ve geri bildirim sinyali olarak kullanılmasıyla duyarlılık ortaya çıkar. İğne yüzey ayırımı tünelleme akımını sabitler. Bu iğneyi sabit uzaklıkta tutabilmek için gereken voltaj yüzeyin bilgisayar görüntüsünü üretmek için kullanılır. İğnenin yüzey

üzerinde düşey hareketi örneğin dış çizgisini izlediği için yüzeyin bir görüntüsü elde edilir [39].

3.3.4. Atomik kuvvet mikroskopisi (AFM)

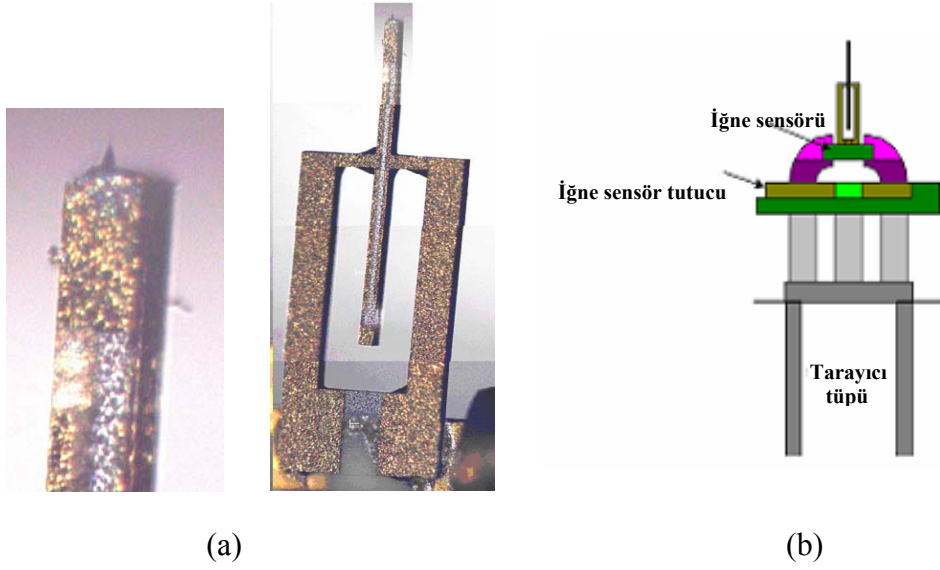
Taramalı Tünelleme Mikroskopunun (STM) başarıları yeni taramalı araştırma mikroskop metotlarının geliştirilmesine esin kaynağı oldu. Bunlardan biri olan Atomik Kuvvet Mikroskobu (Atomic Force Microscopy-AFM) ile malzeme yüzeyi analizleri yapılmaktadır. AFM cihazı, iğne ile örnek arasındaki kuvvetleri (basınçları) algılar. Özellikle yüzey pürüzlülüğünü belirlemede kullanılan hızlı bir tekniktir. Yüzey pürüzlülüğünü değerlendirmek birçok ana problem (örneğin: sürtünme, kontak deformasyonu, ısı ve elektrik akım iletkenliği kontak köşelerin sızdırmazlığı ve yer doğruluğu) için önemlidir. Bu sebeple yüzey pürüzlülüğü onlarca yıldır deneysel ve teorik araştırmaların konusu olmuştur [41].

AFM'nin en önemli özelliği, alışılmış elektron mikroskopisi tekniklerinde kaçınılmaz olan, özel örnek hazırlanması, vakum v.b. şartlara ihtiyaç duyulmadan, incelenen örnek yüzeyinin moleküler veya atomik seviyede üç boyutlu görüntüsünü verebilmesidir. Sıvı yada katı yüzey topografisini nanometre (nm) seviyesinde görüntüleyebilen ve moleküller arası kuvvetleri angstrom mertebesinde 100 mikrona kadar ölçebilen bir sistemdir [42].

AFM görüntüleme metotları arasında en yaygın uygulama alanına sahiptir ve hızla gelişmekte olan nanoteknolojiler için vazgeçilmezdir. Elektronik, telekomünikasyon, biyoloji, kimya, otomotiv, uzay-havacılık ve enerji gibi endüstrilerde kullanılmaktadır.

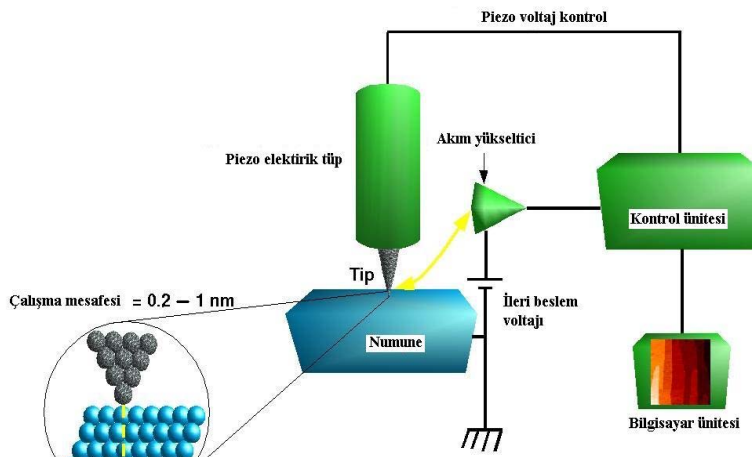
AFM'ler düşük sıcaklıklarda yada boşlukta çalıştırılabilirler. DNA ve proteinler gibi biyolojik yapıların görüntülenmesinde kullanılmış ve hatta bazı kimyasal süreçleri, oluşum sırasında görüntülenmiştir [39].

AFM taranan alanın büyüklüğüne bağlı olan RMS pürüzlülüğünü belirler ve ağırlıklı ortalamasını verir. Ölçülen yapının minimum büyüklüğü ve dolayısıyla RMS pürüzlülüğü AFM iğnesinin (tip) büyüklüğüne ve geometrisine de bağlıdır [14].



Şekil 3.6. Deneylerimizde kullanılan iğne sensörü (needle sensor) a) Mikroskop altındaki görüntüsü b) Şematik gösterimi

AFM ve STM işlemlerinde elektronik paket ve iğne sensörü vardır (Şekil 3.5.). İnce uçlu iğne, örneğin 1nm yakınına kadar yaklaştırılabilmektedir. İğne sensör tünelleme ucu yerine scanner'a monte edilebilir. Sonundaki uçtan ve rezonans Quartz'dan meydana gelir. Quartz 1 MHz civarında frekans ile $-Z$ yönünde salınmak için kullanılır. Yaklaşık 1 MHz frekansında temas etmeyen halde iğne ucu yukarı veya aşağı hareket eder. Tip ve numune birbirine yaklaştırıldığı zaman aralarındaki kuvvet ölçülür.



Şekil 3.7. AFM'in çalışma prensibinin şematik gösterimi [16]

AFM'de çok hassas bir iğnenin (tip) yüzeyi taramasıyla atomlar arası kuvvetler nanonewton hassasiyetiyle ölçülür. Ölçülen yüzeyin özelliklerini büyük bir doğrulukla tespit edebilmek için, ucun uzaysal pozisyonunu ayarlamaya yarayan piezoelektrik güç vericileri kullanılır. Bu hareketten faydalanılarak bilgisayar ortamına aktarılan veriler, yazılım aracılığıyla derlenerek ya numunenin görüntüsü elde edilir yada iğne ve numune arası etkileşimler ölçülür. (Piezoelektriklik, bir kristalin üzerine uygulanan voltaj ile hareket etme özelliğidir.)

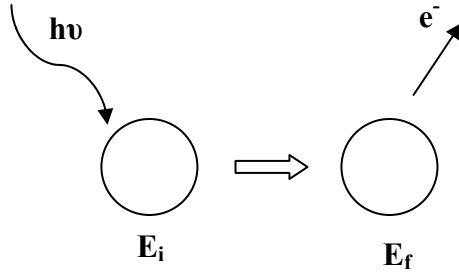
Taramalı tünelleme mikroskopları, malzemenin iletkenlik özelliklerini, Atomik kuvvet mikroskopları yalıtkanlık özelliklerini anlamada ciddi katkılar sağlamıştır. Her iki cihazda kırınım olayından ileri gelen çözünürlük zorluklarını aşmakta ve maddenin Bohr yarıçapı büyüklüğünde, atomik boyutta incelenmesini mümkün kılmaktadır.

3.4. Yüzey Kimyasal Bileşimleri

3.4.1. Fotoelektron spektroskopu (PS)

Fotoelektron spektroskopu (PS), yarıiletken yüzeylerini ve bulk yarıiletkenlerinin elektriksel özelliklerini incelemek için yaygın olarak kullanılan metotlardan biridir. PS'lerinin birkaç farklı formu vardır. En yaygın metot ultraviyole fotoelektron spektroskopu (UPS) ve X ray fotoelektron spektroskopu (XPS) olarak bilinir. UPS 5-

100 ev arasındaki ultraviyole ışığı kullanırken, XPS 100 ev un üzerinde enerjiye sahip X ışın fotonlarını kullanır.



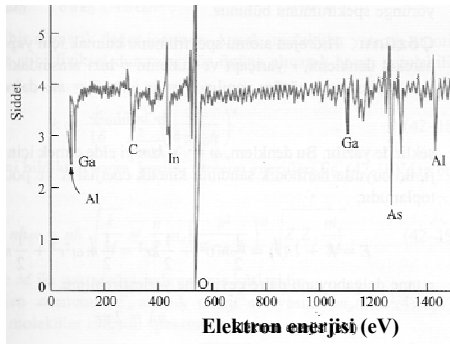
Şekil 3.8. Tek bir atom tarafından emilmenin basit sunumu ve foto elektron emisyonu

Eğer bir X ışınlı foton içeren tek atom söz konusuysa toplam enerji $h\nu + E_i$ dir. Burada $h\nu$ foton enerjisidir ve E_i de atomun başlangıç durumundaki enerjisidir. Fotonun emilmesi ve fotoelektronun yayılımında (emisyonunda) toplam enerji $K + E_f$ olur. K elektronun kinetik enerjisi ve E_f de atomun son durumdaki enerjisidir. Son durumda atom iyonlaşır. Toplam enerji $h\nu + E_i = K + E_f$ olarak korunur. $h\nu - K = E_f - E_i = E_B$ dir. Foton enerjisi ve elektron enerjisi arasındaki fark elektronun uzaklaştırıldığı orbitalin (yörüngenin) bağlanma enerjisine eşittir. Bağlanma enerjisi atomun ilk durumundaki toplam enerjisiyle, iyonun son durumdaki toplam enerjisi arasındaki farka bakılarak karar verilir. Kabaca elektron yörüngesinin Hartree–Fock enerjisine eşittir ve böylece PS'daki tepeler spesifik (özel) atomlarla tanımlanabilir ve dolayısıyla yüzey bileşenlerinin analizi yapılabilir. Eğer XPS en yüksek foton enerjisini kullanırsa en yüksek bağlanma enerjisine sahip olan elektronlar çekirdek seviyesinden uzaklaştırılabilirler. Sonra XPS deney enerji tablosu çizilebilir.

3.4.2. Auger elektron spektroskopu

Auger elektron spektroskopu, bağlanma durumunu öğrenmek için iç enerji seviyelerini kullanır. Bu teknikte, enerjileri 50 keV olan elektron veya fotonlar ile malzeme bombardıman edilir. İç kabuklardaki deşikler, yukarı enerji seviyesindeki elektronlar tarafından doldurulma eğilimine karşı kısa bir süre

direnirler. Ancak yüksek seviyedeki elektronun iç yörünge deşğini doldurması sırasında kayda değer bir enerji açığa çıkarır. Bunun yok edilmesinin bir yolu, enerjinin yüksek yörüngede bulunan başka bir elektrona aktarılmasıdır. Bu elektron daha sonra iç yörünge doldurulması sırasında açığa çıkan enerji ve bağlanma enerjisi arasındaki farka eşit bir kinetik enerji ile fırlatılır. Fırlatılan elektronlara *auger elektronları* denir. Bu işlem kimyasal bağ hakkında bilgi verir. Kuantum mekaniğine göre dış yörünge elektronlarının iç yörüngelerde bulunması olasılığı sonludur. Dış elektronlar çekirdeği iç elektronların etkisinden bir dereceye kadar perdeler ve bu nedenle de iç yörünge enerjilerini etkilerler. Böylece, yayılan auger elektronlarının enerjisi de etkilenmiş olur. Şekil 3.9'daki gibi yayılan elektronların sayısını ölçerek, dış kabuktaki elektronların sayısı ve böylece bağ yapısı belirlenir [39].



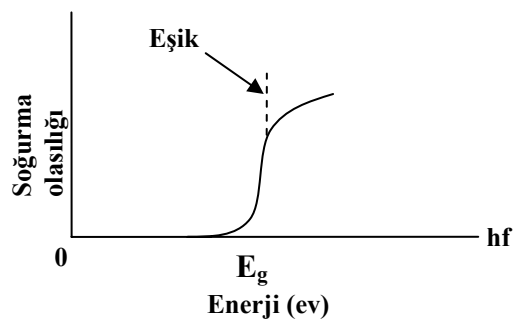
Şekil 3.9. Yayılan Auger elektronlarının spektrumu farklı atomların ve moleküller bağlanma etkilerinin özelliği olan keskin çizgiler oluşturur [39]

Bir atomun bağlı durumunu belirlemek organik ve inorganik kimyada önem taşır. Örneğin, bir moleküldeki demir atomu iki değerlikli mi üç değerliklidir? Başka bir deşikle, demir atomu kaç dış yörünge elektronunu komşularıyla paylaşmaktadır? Çok sayıda komşu atom ve moleküllerin etkilerinden dolayı, dış yörüngelerin enerjileri kesin olarak belirlenemez. Bunun sonucunda, bağlanma enerjilerini hesap için dış yörünge enerjilerini doğrudan kullanmak oldukça zordur. Dış yörüngeler, iç kısımları perdeleyerek, komşu atom çokluklarının etkisini ortadan kaldırır. Bu nedenle iç yörüngeler kesin olarak tanımlı enerji seviyeleri oluştururlar [39].

3.5. Optiksel Teknikler

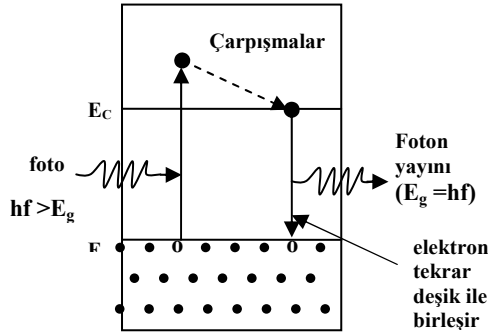
3.5.1. Fotolüminesans (PL)

Bir foton yarıiletken çarptığında, foton elektron sistemi tarafından belli bir olasılık ile soğurulur. Soğurma foton frekansı f 'nin fonksiyonu olan bir eşik değere sahiptir (Şekil 3.10). Malzeme içerisindeki bir elektron fotonu ancak foton enerjisi, hf , bant aralığı enerjisine eşit ve büyükse soğurur; sadece bu enerjilerde iletkenlik bandında elektronun doldurabileceği boş seviyeler bulunur. Bu nedenle, bazı malzemeler belirli frekans aralıklarında geçirgendirler (bir foton soğurulmadan geçip gidebilir), ancak daha yüksek frekanslarda aynı şekilde davranamazlar. İletkenlik bandına fırlatılmış olan bir elektron, örgü atomları ile çarpışarak enerjisi yaklaşık olarak E_C 'ye düşene dek enerji kaybeder; burada daha fazla enerji kaybetmesi dışarlama ilkesi ve/veya E_C 'nin altında enerji seviyeleri olmayışı ile engellenir. Bu durumda, elektronun enerji kaybetmesinin yolu değerlik bandındaki bir deşiğe geri dönmesidir, bu sürece yeniden birleşme adı verilir. Elektron-deşik yeniden birleşmesi frekansı $hf_g = E_g$ eşitliğini sağlayan bir ışınım yayar (şekil 3.10). Bu ışınım fotolüminesans denir. Elektronlar, başlangıçta malzemenin yüksek enerji elektronları (katodlüminesans) ile bombardımana tutulması veya malzeme içerisinde bir elektrik akımının etkisi (elektrolüminesans) ile farklı şekillerde de uyarılarak iletkenlik bandına geçebilirler [39].



Şekil 3.10. Fonon enerjisine karşı soğurma olasılığı

Şekil 3.10’da foton enerjisi bant enerjisi aralığına eşit olduğunda, yarıiletkendeki foton soğurulması olasılığının bir alt eşik değeri bulunur. Soğuran elektron için düşük enerji düzeylerinde hiç enerji düzeyi yoktur. Foton enerjisi frekansı ile orantılı olduğundan, enerji alt sınırı frekans alt sınırı olarak ifade edilir.



Şekil 3.11. Foton soğurması ile iletkenlik bandına geçiş

Şekil 3.11’de foton soğurulması ile iletkenlik bandına geçen bir elektron, enerjisi E_C ’ye düşene kadar çarpışmalarla enerji kaybeder; bu noktada foton yayarak değerlik bandındaki bir deşikle yeniden birleştiği görülmektedir.

3.5.2. Fotolüminesans uygulamaları

Bant aralığının belirlenmesi: Yarıiletkenlerdeki en yaygın ışımali geçiş, iletim ve valans bantları arasındaki geçiştir. Bant aralığının belirlenmesi özellikle yeni bileşik yarıiletkenlerin uygulamalarında önemlidir [43].

Safsızlık seviyeleri ve kusurlar: Yarıiletkenler ışımali geçişlere izin veren safsızlık seviyeleri ve kusurları içerirler. Bu seviyelerle bağlantılı olan fotolüminesans kusurları belirtmek için faydalıdır ve fotolüminesans miktarı ise bunların derişimlerini belirlemek amacıyla kullanılabilir [43].

Birleşme mekanizmaları: “Rekombinasyon” olarak da bilinen dengeye dönüş hem ışımali hem de ışımaz süreçleri içerebilir. Fotolüminesans miktarı safsızlık

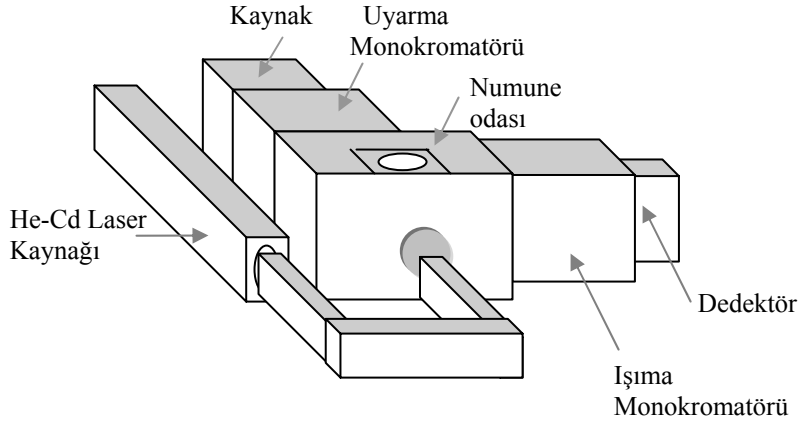
seviyeleriyle ve sıcaklıkla doğrudan bağlantılıdır. Fotolüminesans analizi birleşme mekanizmasının temel fiziğini anlamaya yardımcı olur [43].

Malzeme kalitesi: Genelde ışımalı olmayan süreçler, malzeme kalitesine ve sonradan cihaz performansına zararlı olan lokalize safsızlık seviyeleri ile ilgilidir. Bu nedenle malzeme kalitesi, ışımalı birleşme miktarı hesaplanarak ölçülebilir [43].

PL (fotolüminesans) ölçümleri, elektriksel uyarma gerektirmediği için numune hazırlanması minimaldir. Bu özellik fotolüminesans'ı, düşük iletkenlikteki gelişmemiş kontak eklem teknolojilerindeki sistemler de önemli kılar. PL ölçümlerinde, ilerleyen dalganın PL şiddeti ve spektrumunun ölçümü hızlıdır. PL, numunelerde hızlı ve geçici davranışların incelenmesi için kullanılan mümkün tekniklerden biridir [44]. Ayrıca PL, araştırılan yüzey üzerinde küçük bir etkiye sahiptir. Yani yüzeye zarar vermez.

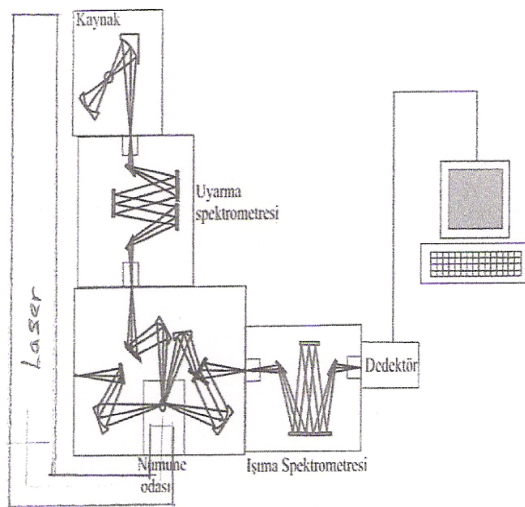
Fotolüminesans ölçümleri için kullanılan deneysel düzenekler, laboratuvarlara yada kullanılan cihazlara ve ölçülmek istenen özelliklere göre bazı değişiklikler gösterir. Ancak bu düzeneklerde esas prensip aynıdır. Optiksel bir ışık kaynağı ile uyarılan sistemin kendiliğinden yaptığı ışınımın toplanması ve dalgaboyuna yada enerjiye göre spektrumun elde edilmesi en temel prensiptir [45].

Tez çalışmamızda kullanılan deneysel düzeneğin basit gösterimi Şekil 3.12'de verilmiştir.



Şekil 3.12. Fotolüminesans ölçümlerinde kullanılan deneysel düzenek

PL ölçümlerinde gerçekleşen fiziksel olaylar ise Şekil 3.12’de şematik olarak gösterilmiştir. Işık kaynağından gelen ışık, uyarma spektrometresine gönderilir. Uyarma spektrometresi, numuneye tek bir dalgaboyuna sahip ışık ışınının gönderilmesi için, ışığı içindeki aynalar vasıtasıyla filtre eder. Numune odasındaki numune, gönderilen ışık ışınına maruz bırakılır. Numuneden yansıyan ışık, ışıma spektrometresi yardımıyla filtre edilerek dedektöre gönderilir. Dedektör yardımıyla elektrik akımına çevrilen sinyaller bilgisayara gönderilerek, dalgaboyuna karşılık FL şiddetindeki değişiminin spektrumunu gösteren bir grafik üretilir [45].



Şekil 3.13. PL ölçümlerinde gerçekleşen fiziksel olaylar

PL ölçümleri, herhangi bir çevre (dış şartlar) yada yüzeyde yapılabildiği için yüzey değişimleri ile oluşan olaylar denetlenebilir. Diğer optiksel karakterizasyon metotları ile karşılaştırıldığında PL, numune kalınlığında yüzey düzgünlüğünde ışın dizilmesi gibi konularda daha az sınırlayıcı kurala sahiptir [45].

4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada incelenen $\text{Al}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{N}$ çoklu yapı Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezinde MOCVD tekniği ile Schotkky fotodedektör geliştirmek amacıyla büyütüldü. Çizelge 1’de örneğin yapısı şematik olarak gösterilmiştir. Örneğin büyütme süreci ise şu şekildedir:

İlk adımda (0001) yönelimli safir alttaş üzerine 10 nm kalınlıklı AlN çekirdek katman $840\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’de ve 50 mbar reaktör basıncında büyütüldü. İkinci adımda 300 nm kalınlıklı AlN tampon katman $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’de ve 25 mbar reaktör basıncında büyütüldü. Üçüncü adımda 10 nm kalınlıklı AlN katman 50 mbar reaktör basıncında büyütüldü. Dördüncü adımda 450 nm kalınlıklı n tipi AlGaN alaşım katman $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’de ve 25 mbar reaktör basıncında büyütüldü. Son olarak ise beşinci adımda 350 nm kalınlıklı AlGaN alaşım katmanı $1075\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’de ve 25 mbar reaktör basıncında büyütüldü.

Çizelge 4.1. $\text{Al}_{0.52}\text{Ga}_{0.48}\text{N}$ örneğin şematik yapısı

AlGaN (350 nm)
n- AlGaN (450 nm)
LT- AlN (10 nm)
LT- AlN tampon (300 nm)
AlN çekirdek (10 nm)
Safir alttaş

Bu çalışmanın amacına uygun olarak örnek önce tavlama işlemine tabi tutuldu. Tavlama işleminin hemen ardından AFM ve PL teknikleri ile tavlamanın morfolojiksel ve optiksel özellikler üzerine etkisi araştırıldı. Tavlama işleminden önce örnek izopropil alkol ($\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$) ile temizlendi. Azot (N_2) ortamında tavlama işlemi için örnek malzeme vakum içine yerleştirilerek yedek pompa

çalıştırıldı. Basınç ölçer ve turbo açılarak ısı ölçer ($T=800^{\circ}\text{C}$) ayarlandı. 800, 900 ve 960°C sıcaklarda 240 sn tavlandı ($I= 6,8\text{ A}$ $V= 63,1\text{ V}$ $P= 1,3 \times 10^{-3}\text{ mbar}$). Daha sonra soğutmak için ısıölçer tekrar, her sıcaklık için 20°C 'ye ayarlanarak tavlama işlemi tamamlandı. Tavlama öncesi ve tavlama sonrası örneğin AFM ve PL ölçümleri yapıldı. AFM ölçümleri için Omicron VT STM/AFM cihazı ve Fotoluminesans (PL) ölçümleri için Jobin Yuan-Horiba cihazı kullanıldı. AFM ölçümleri oda sıcaklığında ve atmosfer basıncında yapıldı. PL ölçümleri 325 nm dalgaboyunda ışık üreten He-Cd lazeri kullanılarak fotoluminesans cihazı ile oda sıcaklığında gerçekleştirildi.

Bu bölümde tavlama işleminin örneğin yüzey ve optiksel özellikleri üzerindeki etkileri tartışılacaktır.

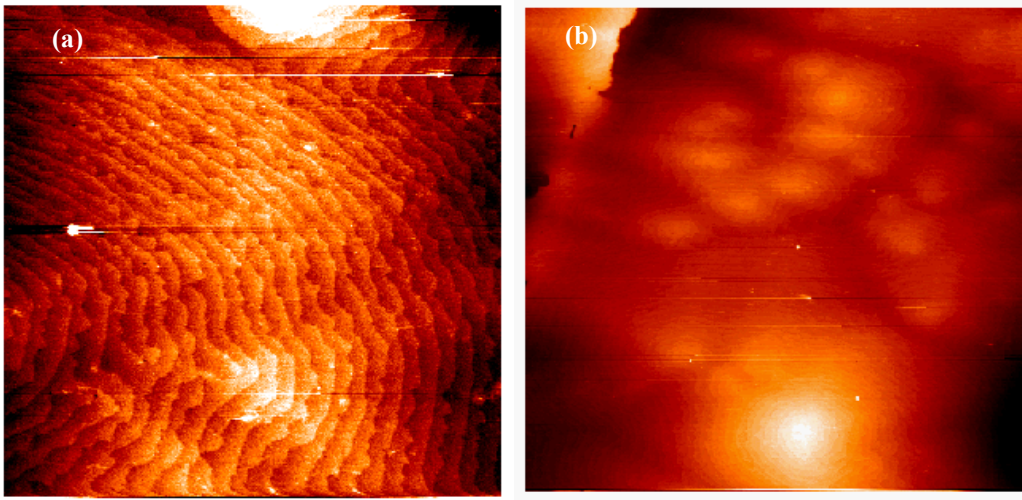
4.1. Yüzey Karakterizasyonu

AFM filmlerin yüzeyleri üzerindeki pürüzlülüğü ve kusurları değerlendirme açısından yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Bu çalışmada AFM ölçümlerinde $4\text{ }\mu\text{m}^2$ ve $25\text{ }\mu\text{m}^2$ tarama alanları tercih edildi. Küçük tarama alanında kusurlar daha net bir biçimde görülebilmektedir. Büyük tarama alanı ise örneğin yüzey pürüzlülüğünü, kusur yoğunluğunu vb. değerlendirme açısından daha güvenilirdir.

4.1.1 Örneğin tavlama işlemi öncesi yüzey özellikleri

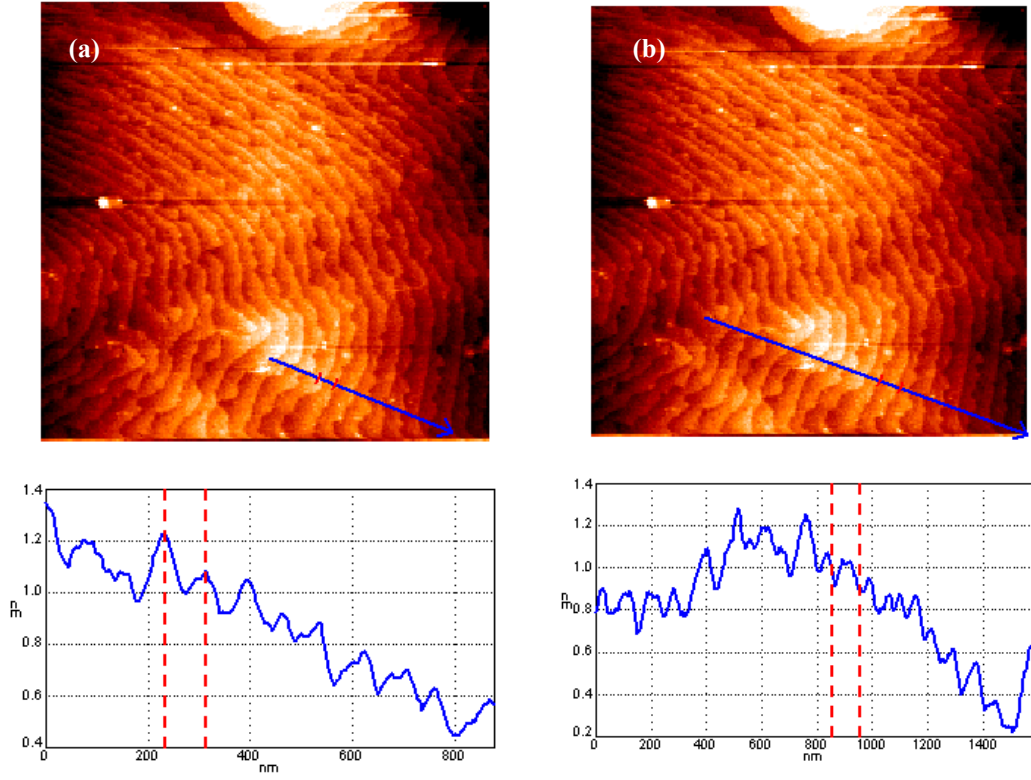
Şekil 4.1.a ve b'de herhangi bir tavlama işlemi uygulanmadan önce oda sıcaklığında örneğin AlGaIn yüzeyi üzerinden alınan $4\text{ }\mu\text{m}^2$ ve $25\text{ }\mu\text{m}^2$ tarama alanlı AFM görüntüleri sunuldu. Her iki görüntüde de yüzey üzerinde basamaklı yapının (step - flow) olduğu görülmektedir. Bununla birlikte küçük tarama alanlı AFM görüntüsünden (Şekil 4.1.a) yüzey üzerinde oldukça düşük yoğunlukta nanometre büyüklüğünde yüzeyden içeri doğru uzanan borular (nanopipes) olduğu gözlemlendi. Basamaklı yapının büyüme cihaz performansı açısından faydalı iken nano-borular

cihaz performansını olumsuz yönde etkiler. Ayrıca yüzey üzerindeki basamakların birbirine paralel olduğu ve bazı bölgelerde spiral olarak büyüdüğü görülmektedir. Bunun yanı sıra Şekil 4.2.a ve b'de de açıkça görüldüğü gibi yüzey üzerindeki basamak yükseklik farkının 0,22 nm, ortalama basamak genişliğinin ise 100 nm olduğu belirlendi. AlGaIn yüzeyi üzerinde ölçülen basamak yükseklik farkı yaklaşık 0,5 Al kompozisyonuna sahip bir monolayer AlGaIn değerine oldukça yakındır.



Şekil 4.1. Örneğin tavlardan önceki a) $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ b) $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ tarama alanlı AFM görüntüleri

Basamak genişlikleri yüzey pürüzlülüğünü değerlendirme açısından oldukça önemlidir. Çünkü yüzey üzerindeki dar basamaklar yüzeyin pürüzlü, geniş basamaklar ise yüzeyin pürüzsüz olduğu anlamına gelmektedir. Torabi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada ortalama basamak genişliği 100 nm civarında olan AlGaIn yüzeylerinin pürüzsüz olduğunu ifade ettiler [45]. Ölçülen basamak genişliği göz önüne alındığında, örneğin düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu söylenebilir. Yüzey pürüzlülüğünün en önemli göstergelerinden biri de AFM ölçümlerinden elde edilen RMS (Root Mean Square) değeridir. Örneğin yüzeyi üzerindeki $4 \mu\text{m}^2$ ve $25 \mu\text{m}^2$ tarama alanlı AFM ölçümlerinden elde edilen yüzey RMS değerleri sırasıyla 0,30 nm ve 1,65 nm'dir. Hem RMS değerleri hem de basamak genişliği örneğin oldukça düşük bir yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğunu net bir biçimde ortaya koymuştur.

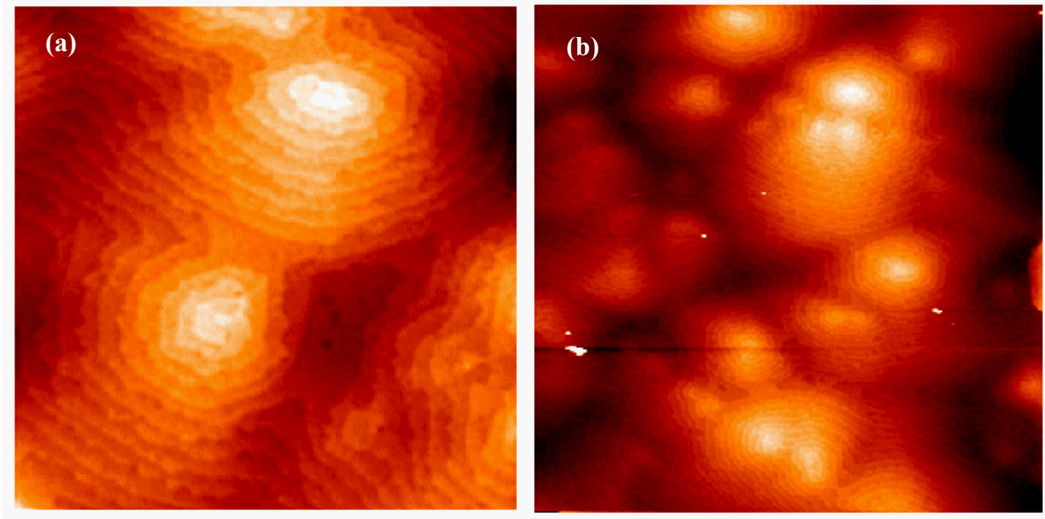


Şekil 4.2. Örnek yüzeyi üzerindeki a) basamak yükseklik farkı 0,22 nm, b) ortalama basamak genişliği 100 nm

4.1.2. Örneğin 800 °C'ye tavlama sonrası yüzey özellikleri

Şekil 4.3.a ve b'de 800 °C tavlama işleminden sonra örneğin AlGaN yüzeyi üzerinden alınan 4 μm^2 ve 25 μm^2 tarama alanlı AFM görüntüleri sunuldu. Tavlama sonrası yüzey üzerindeki basamaklı yapının değişmediği gözlemlendi. 4 μm^2 ve 25 μm^2 tarama alanları için pürüzlülük (rms) değerleri sırasıyla 0,51 ve 1,03 nm olarak ölçüldü. Büyük tarama alanlı ölçüm sonucu elde edilen RMS değeri örneğin yüzey pürüzlülüğünü değerlendirme açısından daha önemlidir. Çünkü bu değer örneği daha iyi temsil eder. Bu durumda tavlama öncesi ve tavlama sonrası büyük tarama alanlı (25 μm^2) AFM görüntüleri dikkate alındığında yüzey pürüzlülüğünün belirgin bir biçimde düştüğü görülmektedir. Şekil 4.3'deki küçük tarama alanlı AFM görüntüsünde (4 μm^2) yüzey pürüzlülüğündeki artış ölçümün alındığı bölgedeki

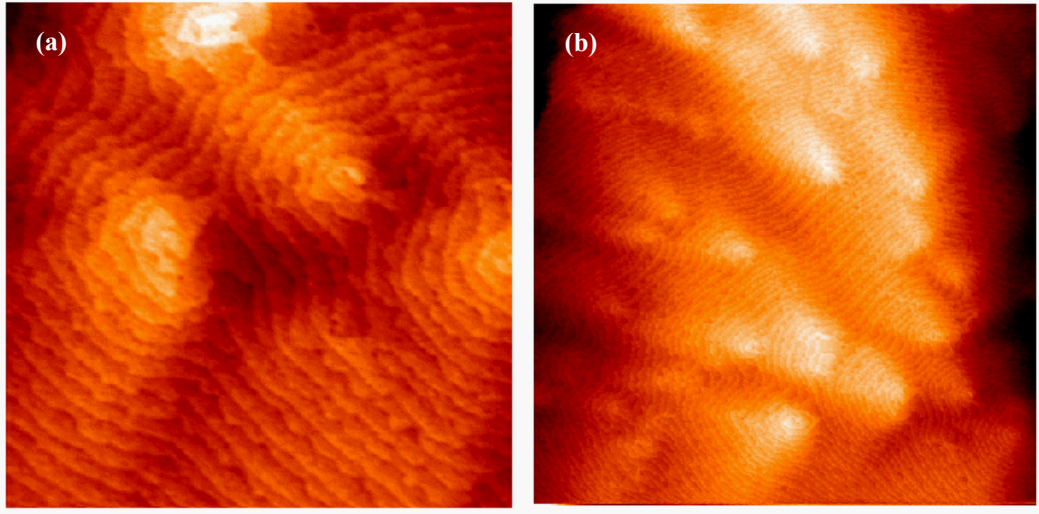
spiral büyüme yoğunluğu ve boyutlarıyla ile ilişkili olabilir. Bu ilişki daha sonraki tavlama işlemlerinden sonra yapılacak AFM ölçümleri sonunda netlik kazanacaktır.



Şekil 4.3. Örneğin 800 °C'ye tavlandıktan sonraki a) 2x2 μm^2 b) 5x5 μm^2 tarama alanlı AFM görüntüleri

4.1.3. Örneğin 900 °C'ye tavlama sonrası yüzey özellikleri

Şekil 4.4.a ve b'de 900 °C tavlama işleminden sonra örneğin AlGaIn yüzeyi üzerinden alınan 4 μm^2 ve 25 μm^2 tarama alanlı AFM görüntüleri sunuldu. Her iki görüntüden de anlaşılacağı üzere tavlama öncesindeki ve 800 °C'ye tavlama sonrasındaki benzer şekilde AlGaIn yüzeyi üzerindeki basamaklı yapının korunduğu gözlemlendi. 4 ve 25 μm^2 tarama alanlarından ölçülen yüzey pürüzlülük (rms) değerleri sırasıyla 0,26 ve 0,89 nm'dir. Büyük tarama alanından ölçülen yüzey pürüzlülüğünün 800 °C tavlama işleminden sonrakine benzer bir biçimde düştüğü görüldü. 900 °C'ye tavlama işleminden sonra küçük tarama alanından ölçülen yüzey pürüzlülüğünün de düştüğü görülmektedir. Bu sonuç daha önce ifade edilen pürüzlülük ile spiral büyüme yoğunluğu ve boyutları arasındaki ilişkiyi daha da güçlü hale getirmiştir.



Şekil 4.4. Örneğin 900 °C'ye tavlandıktan sonraki a) 2x2 μm^2 b) 5x5 μm^2 tarama alanlı AFM görüntüleri

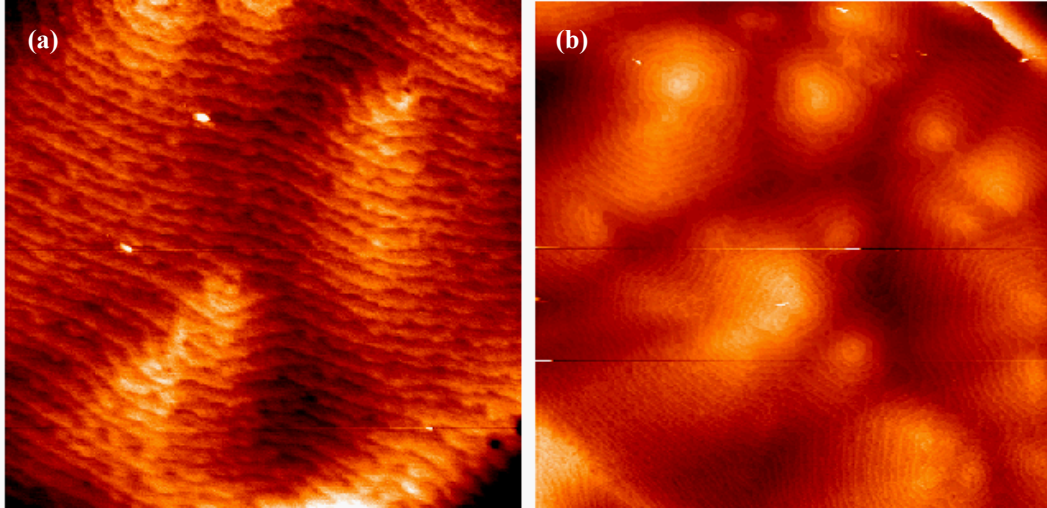
4.1.4. Örneğin 960 °C'ye tavlama sonrası yüzey özellikleri

Şekil 4.5.a ve b'de 960 °C tavlama işleminden sonra örneğin AlGaIn yüzeyi üzerinden alınan 4 μm^2 ve 25 μm^2 tarama alanlı AFM görüntüleri sunuldu. Tavlama öncesi ve daha önceki tavlama işlemleri (800, 900 °C) sonrasında olduğu gibi yüzey üzerinde yine basamaklı yapı gözlemlendi. Bununla birlikte yüzey üzerinden 4 μm^2 ve 25 μm^2 tarama alanları için ölçülen pürüzlülük (rms) değerleri sırasıyla 0,21 ve 0,74 nm'dir. Diğer tavlama işlemlerinden sonra olduğu gibi yüzey pürüzlülüğünde 960 °C'ye tavlama işleminden sonra da düşüş meydana geldiği görüldü.

AFM ölçümleri tavlama işlemlerinden sonra (800, 900, 960 °C) örnek yüzeyi üzerindeki basamaklı yapının korunduğu görüldü. Tavlama işlemi önce ve tavlama sonrası küçük ve büyük tarama alanlı AFM ölçümlerinden elde edilen yüzey RMS pürüzlülük değerleri Çizelge 4.2'de özet olarak sunuldu.

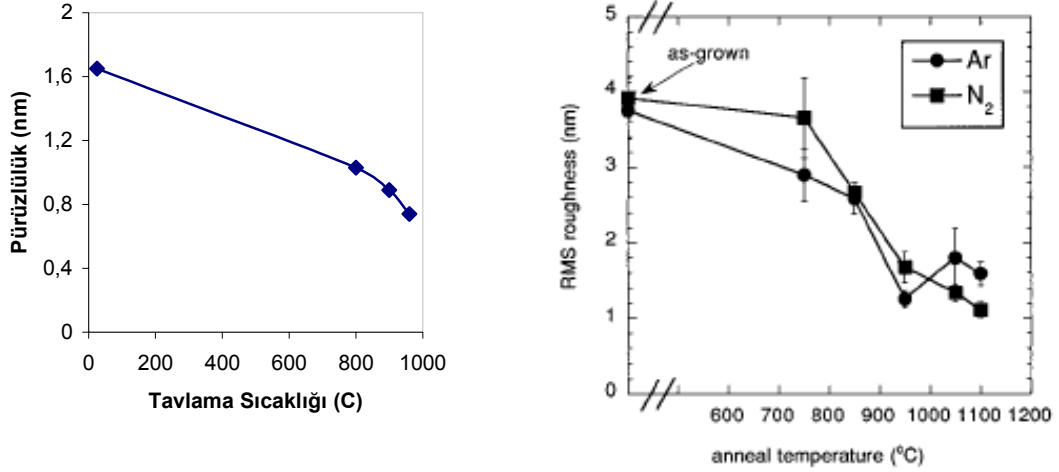
Çizelge 4.2. Tavlama sıcaklığına karşı RMS değerleri

Tavlama sıcaklığı (°C)	RMS (nm) Tarama Alanı 2x2 μm^2	RMS (nm) Tarama Alanı 5x5 μm^2
Tavlama öncesi (RT)	0,30	1,65
800	0,51	1,03
900	0,26	0,89
960	0,21	0,74

Şekil 4.5. Örneğin 960 °C'ye tavlandıktan sonraki a) 2x2 μm^2 b) 5x5 μm^2 tarama alanlı AFM görüntüleri

Şekil 4.6.a'da yüzey pürüzlülüğünün tavlama sıcaklığına göre grafiği çizildi. Çizelge 4.2'de ve Şekil 4.6.a'da yüzey pürüzlülüğünün tavlama sıcaklığına göre şiddetli bir biçimde azaldığı görüldü. Şekil 4.6.b'de gösterilen Zolper ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada da N_2 ve argon (Ar) ortamında tavlanan GaN filmlerin yüzey pürüzlülüğünün tavlama sıcaklığına göre azaldığı belirlenmiştir [46]. Bizim sonuçlarımız daha önce yapılan çalışmalarla uyum içindedir [46]. Yüzey pürüzlülüğünde meydana gelen bu değişim örneğin termal dayanıklılığına ve yüzey kusurlarının azalmasına atfedilmektedir [46]. Bu tür özellikler, önceki araştırmalardan da bilindiği üzere daha iyi elektriksel ve optiksel özelliklere (sızıntı

veya kaçak akımlarının azalması, yüksek mobilite, iletim ve duyarlılık) yol açmaktadır. Daha iyi elektriksel ve optiksel özellikler ise cihaz performansını olumlu yönde etkilemektedir.



Şekil 4.6. a) N₂ ortamında tavlama işlemi yapılmış AlGaIn için pürüzlülük durumu
b) Zolper ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada N₂ ve Ar tavlama işlemi yapılmış örnekler için yüzey pürüzlülük durumu

4.2. Optiksel Karakterizasyon

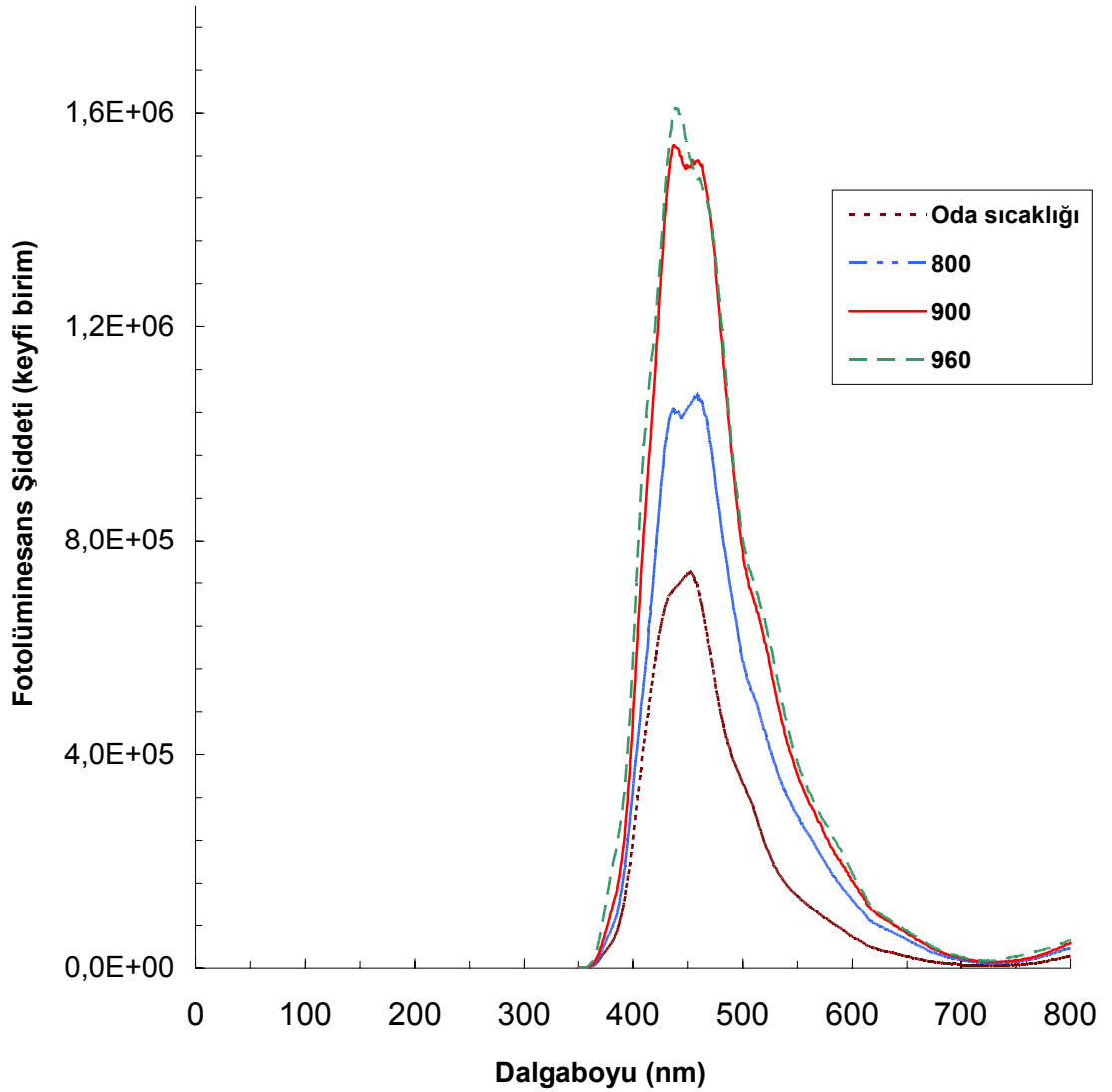
AlGaIn Schottky fotodedektör geliştirmek için hazırlanan örnek 800, 900 ve 960 °C'ye kadar tavlama işlemine tabi tutuldu. Örneğin, tavlama işleminden önce ve her bir tavlama işleminden sonra oda sıcaklığında Fotoluminesans (PL) ölçümleri yapıldı.

4.2.1. Fotoluminesans sonuçları

AlGaIn SPD örneğin, PL şiddetinin dalga boyuna bağlı grafiği Şekil 4.7'de görülmektedir. Tavlama işlemi öncesindeki pikin dalga boyu 454 nm ye karşılık gelmektedir. 800 °C tavlama sonrasında PL pikinde yarımlar belirginleşmiştir ve bu piklerin dalga boyları sırasıyla 441 nm ve 461 nm'dir. 900 °C tavlama sonrasında yarımla devam etmiştir. Bu yarımlar kusurlardan kaynaklanabilir. 960 °C tavlama sonrasında ise yarımla azalmıştır. En yüksek PL şiddeti 960 °C tavlama sonrasında

ölçülmüştür ve bu tavlama sıcaklığında gözlenen PL şiddet değeri $1,6 \times 10^6$ (keyfi birim) dir. Buna karşılık en düşük PL şiddeti ise tavlama öncesinde ölçülmüştür. Bu sıcaklıkta PL şiddeti değeri $0,74 \times 10^6$ (keyfibirim) dir.

Tavlama Sıcaklığına Göre PL Grafiği



Şekil 4.7. Tavlama sıcaklığına göre PL grafiği (325 nm dalgaboylu He-Cd lazer kaynağı kullanılmıştır)

Yapıdaki her bir materyalin yasak enerji aralığı uyarılma foton enerjisinden ($\sim 4,86$ eV) yüksek olduğundan PL spektrumunda banttan-banda geçişlere ilişkin herhangi bir ışıma gözlemlenememiştir. Bu sistemimizde bulunan uyarıcı ışık kaynağının

uygun dalga boyunda (325 nm- 3,82 eV) olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle gözlemlenen ışımlar çoklu yapıdaki çeşitli kusurlardan kaynaklanmaktadır. Ayrıca bu pikler safsızlık seviyelerinden dolayı oluşan piklerdir. Grafik incelendiğinde tavlama sıcaklığı arttıkça, PL piklerinin şiddetinin arttığı gözlemlenmiştir. AFM ölçümlerinde yüzey pürüzlülük değerlerinin azaldığı görülmüştür. Benzer bir düzelmelerin ara yüzeylerde de olduğu düşünülür ise PL şiddeti artar. Bu sonuçlar malzemenin kalitesinin iyileştiğine işaret etmektedir.

Benzer bir çalışma Zolper ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada GaN hem Ar hem de N₂ ortamında 1100 °C ye kadar tavlansmıştır. GaN filmlerin PL şiddetinin, tavlama işlemi öncesiyle karşılaştırıldığında arttığı görülmüştür. Sonuç olarak örneğin kalitesini artırdığına atfedilmektedir. Yapılan diğer çalışmalarda gözönüne alındığında tavlama sıcaklığı arttıkça AlGaN örneğinin kalitesinin arttığı gözlenmiştir [9].

5. SONUÇ

AlGaN çoklu yapının tavlama işlemine göre yüzey özellikleri ve optiksel özellikleri incelenmiştir. Tavlama işleminden önce yüzey üzerinde basamaklı yapının (step - flow) olduğu gözlemlenmiştir. Yüzey RMS değerleri ise $4 \mu\text{m}^2$ ve $25 \mu\text{m}^2$ tarama alanı için sırasıyla 0,30 nm ve 1,65 nm'dir. RMS değerleri ve basamak genişliği incelendiğinde örneğin oldukça düşük bir yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu görülmüştür. 800°C tavlama işleminden sonra yüzey üzerindeki basamak yapısının değişmediği gözlemlenmiştir. RMS değerleri ise 0,51 nm ve 1,03 nm olarak ölçülmüştür. Küçük tarama alanlı yüzey pürüzlülüğündeki artış ölçümün alındığı bölgedeki spiral büyüme yoğunluğuna bağlanabilir. 960°C 'deki tavlama işleminden sonra ise RMS değerleri $4 \mu\text{m}^2$ ve $25 \mu\text{m}^2$ için sırasıyla 0,21 nm ve 0,74 nm'dir. Diğer tavlama işlemlerinden sonra olduğu gibi yüzey pürüzlülüğünde düşüş olduğu görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğünün tavlama sıcaklığına göre azaldığı, meydana gelen bu değişimin örneğin termal dayanıklılığına ve yüzey kusurlarının azalmasına atfedilmektedir.

AlGaN çoklu yapının $800, 900, 960^\circ\text{C}$ 'ye kadar tavlama işleminden önce ve her tavlama sonrasında oda sıcaklığında PL ölçümleri yapıldı. Tavlama öncesi PL şiddeti değeri $0,74 \times 10^6$ dir ve pikin dalga boyu 454 nm'ye karşılık gelmektedir. 800°C tavlama sonrasında PL pikinde yarılmalar belirginleşmiştir. 900°C 'de yarıлма devam etmiştir. Bu yarılmalar kusurlardan kaynaklanabilir. 960°C tavlama sonrasında ise yarıлма azalmış ve PL şiddeti değeri $1,6 \times 10^6$ keyfi birim olarak ölçülmüştür. Yaptığımız incelemede PL piklerinin şiddetinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar malzeme kalitesinin iyileştiğine işaret etmektedir.

KAYNAKLAR

1. Biyikli, N., “High-performance $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -Based UV photodetectors for visible/solar-blind applications”, Doktora Tezi, *Bilkent Ün. Elektrik ve Elektronik Mühendisliği*, Ankara, 1-122 (2004).
2. Nakamura, S., Senoh, M., Iwasa, N., Nagahama, S-I., “High-Brightness InGaN Blue, Green and Yellow Light-Emitting Diodes with Quantum Well Structures”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 34: L797 (1995).
3. Pankove, J. I., “Perspective on gallium nitride”, *Proc. MRS Symp*, 162: 515–520 (1990).
4. Osinsky, A., Gangopadhyay, S., Khan, M. A., “Schottky barrier photodetectors based on AlGaN”, *Appl. Phys. Lett.*, 72: 742-744 (1998).
5. Monroy, E., Calle, F., Pau, J. L., and Munoz, E., “Analysis and modeling of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -based Schottky barrier photodiodes”, *J. Appl. Phys.*, 88: 2081-2091 (2000).
6. Bai, J., Wang, T., Parbrook, P.J., Lee, K. B., Cullis, A.G., “ A study of dislocations in AlN and GaN films grown on sapphire substrates”, *Journal of Crystal Growth*, 282: 290-296 (2005).
7. Munoz, E., Monroy, E., “(Al,Ga)N Ultraviolet photodetectors and Applications”, *Phys. Stat. Sol.*, 180: 293-300 (2000).
8. Chen, Q., Yang, J.W., Osinsky, A., “Schottky barrier detectors on GaN for visible-blind ultraviolet detection”, *Appl. Phys. Lett.*, 70: 2277-2279 (1997).
9. Zolper, J. C., Hagerott Crawford, M., and Howard, A. J., “Morphology and photoluminescence improvements from high-temperature rapid thermal annealing of GaN”, *Appl. Phys. Lett.*, 68: 200-202 (1996).
10. Sobolev, N. A., Emel’yanov, A. M., Sakharov, V.I., “Photoluminescence in Er-implanted AlGaN/GaN superlattices and GaN epilayers”, *Physica B*, 340-342, 1108-1112 (2003).
11. Hassan Z, Lee, Y. C., Abdullah, M. J., “Dark current characteristics of thermally treated contacts on GaN- based ultraviolet photodetectors”, *Microelectronic Engineering*, 81: 262-267 (2005).
12. Senthil Kumar, M., Sonia G., “Thermal stability of GaN epitaxial layer and GaN/sapphire interface”, *Physica B*, 324: 223-228 (2002).

13. Rajasingam, S., Younes, C. M., Grandjean, N., “High-temperature annealing of AlGaN: Stres, structural, and compositional changes”, *Journal of Applied Physics*, **94**: 6366-6371 (2003).
14. Schmidting, T., Pohl U.W., Richter, W., “In situ spectroscopic ellipsometry study of GaN nucleation layer growth and annealing on sapphire in metal- organic vapor-phase epitaxy”, *Journal of Applied Physics*, **98**: 33522-1-5 (2005).
15. Ham Sung, Ho, Kim Bo-Kyun, “Desing of layer structures for Schottky type AlGaN UV photodetector”, *Phys. Stat. Sol. (C)*, no 7, 2309-2313 (2003).
16. Ro Lee Cheal, Jo Park Yong, “ Characteristics of UV photodetector fabricated by $Al_{0,3}Ga_{0,7}N/ GaN$ heterostructure”, *Journal of Crystal Growth*, **252**: 51-57, (2003).
17. Tamulaitis, G., Yilmaz, I., Shur, M. S., “Photoluminescence of AlGaN grown on bulk AlN substrates”, *Appl. Phys. Lett*, **85**: no 2, 206-208 (2004).
18. Musayev, E., “Optoelektronik”, *Uludağ Üni.*, Bursa, 4-57 (1997).
19. Wilson, J., Hawkes, J. F. B., “Optoelektronik”, Çeviri: Dr. İbrahim Okur, *Değişim yayınları*, Adapazarı, 282-338 (2000).
20. Donald Neamen, A., “Semiconductor physics and devices: basic principles, 3rd ed.”, *McGraw-Hill*, Boston, 631 (2003).
21. Musayev, E., “Optoelektronik devreler ve sistemler”, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 77-79, 85-95, 107 (1999).
22. Boylestad, R., Nashelsky, L., “Elektronik elemanlar ve devre teorisi”, Doç. Dr. İsmail Coşkun, *M.E.B.*, Ankara, 911-915 (1994).
23. William, D. Callister, Jr., “Materials Science and Engineering: An Introduction, third edition” *USA*, 80-81, 325 (1994).
24. Duke, C. B., “Surface Science: The first thirty years”, Amsterdam; North-Holland, *Surf. Sci.*, 299-300 (1994).
25. Maruska, H. P., Tietjen, J. J., “The preparation and properties of vapor-deposited single-crystal-line GaN, *Appl. Phys. Lett.*, **15**: 327-329 (1969).

26. Manasevit, H. M. Erdmann, F. M. & Simpson, W. I., "The use of metalorganics in the preparation of semiconductor materials.", *J. Electrochem. Soc.*, 118: 1864–1868 (1971).
27. Nakamura, S., Harada, Y., Seno, M., "Novel Metalorganic chemical vapor deposition system for GaN growth", *Appl. Phys. Lett.*, 58: 2021-2023 (1991).
28. Morkoç, H., "Nitride semiconductors and devices", Editor Hull R., *New York*, 99-100 (1999).
29. Pearton, Stephen J., "Optoelectronic properties of semiconductors and Superlattices", Editor Manasreh M.O., *New Mexico, USA*, 241-244 (1997)
30. Amano, H., Kito, M., Hiramatsu, K. and Akasaki, I., "P-type conduction in Mg-Doped GaN Treated With Low-Energy Electron Beam Irradiation (LEEBI)", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 28: L2112-L2114 (1989).
31. Schey, John A., "Introduction to Manufacturing processes 2nd ed.", *Mc Graw Hill, Singapore*, 134 (1987).
32. Zangwill, A., "Physics at Surfaces", *Cambridge University Pres*, 79 (1988)
33. Burns, G., "Solid State Physics", *Academic Pres*, 60 (1990)
34. Li, M. F., "Modern Semiconductor Quantum Physics", *World Scientific Publishing*, 211 (1994)
35. Yu, P. Y. and Cardona, M., "Fundamentals of Semiconductors", *Springer-Verlag, Berlin Heidelberg*, 415 (1996)
36. Serway, A. R., "Serway, 3rd ed.", K. Çolakoğlu, *Palme Yayıncılık, Ankara*, 1192-1211 (1996).
37. Binning, G., Rohrer, H., Berber, C. and Weibel, E., "Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy", *Phys. Rev. Lett.*, 49: 57-61 (1982)
38. Binning, G., Rohrer, H., "Scanning Tunneling Microscopy- From Birth To Adolescence", *Nobel Lecture*, 389-395 (1986)

39. Fishbane, Paul M., Gasiorowicz Stephen, Stephen T. Thornton “Temel Fizik, Cilt 2”, *Arkadaş Yayıncılık*, İstanbul, 686,1155-1195-1209 (2003)
40. Lee, J. H., Hahm, S. H., “Growth of high quality $Al_xGa_{1-x}N$ with high Al-composition for Schottky-Type UV detector using MOCVD”, *Phys. Stat. Sol. (C)*, no 1, 103-106 (2002).
41. Gadelmawla, E. S., Koura, M. M., Maksoud, T. M. A., Elewa, I. M., Soliman, H. H., “Roughness parameters”, *Journal of Materials Processing Technology*, 123: 133-145 (2002).
42. Oura, K., Lifshits, V. G., Saranin, A. A., Zotov, A. V., Katayama, M., “Surface Science”, *Springer*, Berlin, 19-37, 159-168 (2003)
43. Perkowitz, S., “Optical Characterization of Semiconductors: Infrared, Raman and Photoluminescence Spectroscopy”, *Academic Press*, San Diego, 1-100 (1993).
44. Özkaya, S., “GaAs/ $Al_{0,2}Ga_{0,8}As$ süperörgünün optiksel özelliklerinin fotoluminesans yöntemi ile incelenmesi” , Yüksek lisans tezi, *Gazi Üniv. Fen Bil. Enst.*, Ankara, 29-31 (2005).
45. Torabi, A., Ericson, P., Yarronton, E. J., Hoke, E., “Surface and interface Characterization of GaN/AlGaN high electron mobility transistor structures by x-ray and atomic force microscopy”, *J. Vac. Sci. Technol.*, B 20(3), 1234 (2002).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YILDIRIM, Burcu
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 27.10.1979 Antalya
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (312) 235 38 33
e-mail : burcuyil2007@ hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Fizik Bölümü	2000
Lise	Etimesgut Lisesi	1996

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Tenis, Bilgisayar teknolojileri, Basketbol