

**$Al_{0.47}Ga_{0.53}N$ SCHOTTKY FOTODEDEKTÖR YAPININ
OPTİK VE MORFOLOJİK ÖZELLİKLERİ**

Mehmet ŞEFTALİCİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MART 2010
ANKARA**

Mehmet ŞEFTALİCİ tarafından hazırlanan $Al_{0.47}Ga_{0.53}N$ SCHOTTKY FOTODEDEKTÖR YAPININ OPTİK VE MORFOLOJİK ÖZELLİKLERİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mehmet ÇAKMAK

Tez Danışmanı, Fizik Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Fizik Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof.Dr.Bora ALKAN

FİZİK MÜH., ANKARA ÜNİVERSİTESİ

Prof.Dr. Mehmet ÇAKMAK

FİZİK, GAZİ ÜNİVERSİTESİ

Prof.Dr. Mehmet KASAP

FİZİK, GAZİ ÜNİVERSİTESİ

Tarih: 28/01/2010

Bu tez, ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesi onanmıştır.

Prof.Dr. Bilal TOKLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

Mehmet ŞEFTALİCİ

**Al_{0.47}Ga_{0.53}N SCHOTTKY FOTODEDEKTÖR YAPININ OPTİK VE
MORFOLOJİK ÖZELLİKLERİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

Mehmet ŞEFTALİCİ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MART 2010

ÖZET

Bu tez çalışmasında, Al_{0.47}Ga_{0.53}N üçlü alaşımının oda sıcaklığında, 700, 800, 900, 950 °C' de 240 sn tavlama işlemleri uygulanarak, yüzey morfolojisi ve PL spektrumundaki değişim incelenmiştir. Her bir tavlama işleminden sonra alaşımın karakterizasyonu için Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ve Fotoluminesans (PL) teknikleri kullanıldı. Tavlama sıcaklığına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü önemli ölçüde azaldı ve PL şiddetinde de tavlamaya bağlı olarak önemli bir artış gözlemlendi.

Bilim Kodu : 202.1.147
Anahtar Kelimeler : AFM, FL, AlGa_{0.53}N, yüzey, dedektör
Sayfa Adedi : 46
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Mehmet ÇAKMAK

**THE OPTICAL AND MORPHOLOGICAL PROPERTIES OF $\text{Al}_{0.47}\text{Ga}_{0.53}\text{N}$
SCHOTTKY PHOTODETECTOR**

(M.Sc. Thesis)

Mehmet ŞEFTALİCİ

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

March 2010

ABSTRACT

In that thesis work triple alloy of $\text{Al}_{0.47}\text{Ga}_{0.53}\text{N}$ in the room temperature, by applying annealing operation at 700, 800, 900, 950 °C in 240 second, surface morphology and the change is examined in PL spectrum. After every annealing operation for the characterization of ally Atomic Force Microscopy (AFM) and photoluminescence (PL) techniques are used. Connected to annealing temperature surface roughening is decreased in a big amount and according to annealing an important increase is observed.

Science Code : 202.1.147
Key Words : AFM, PL, AlGa_{0.53}N, surface, detector
Page Number : 46
Adviser : Prof. Dr. Mehmet ÇAKMAK

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli katkıları ile beni yönlendiren danıőman hocam Prof. Dr. Mehmet ÇAKMAK'a ve yine çalıőmalarım süresince katkılarından dolayı Süleyman ÇÖREKÇİ, Aylın BENĐİ, Ceren TAYRAN'a ve manevi desteğinden dolayı eőim Özgöl ŞEFTALİCİ'ye teşekkür ederim.

Bu tez çalışması 2001K120590 nolu proje kapsamında DPT tarafından desteklenmiőtir.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ	1
2. FOTODEDEKTÖRLER	6
3. DENEYSEL TEKNİKLER.....	15
3.1. Kristal Büyütme Teknikleri	15
3.1.1. Metal organik kimyasal buhar depozisyonu	15
3.1.2. Moleküler demet epitaksi.....	16
3.2. Temiz Yüzeylerin Atomik Yapısı	18
3.3. Atomik Olarak Temiz Yüzeylerin Hazırlanması	21
3.4. Atomik Kuvvet Mikroskobu (Atomic Force Microscopy: AFM)	23
3.5. Fotoluminesans	27
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	31
4.1. Yüzey Özellikleri	32
4.1.1. Numunenin tavlama işlemi öncesi yüzey özellikleri	33
4.1.2. Numunenin 700 °C 'ye tavlama sonrası yüzey özellikleri.....	35

Sayfa

4.1.3. Numunenin 800 °C'ye tavllanması sonrası yüzey özellikleri	35
4.1.4. Numunenin 900 °C'ye tavllanması sonrası yüzey özellikleri	36
4.1.5. Numunenin 950 °C'ye tavllanması sonrası yüzey özellikleri	37
4.2. Optik Özellikleri	39
4.2.1. Fotoluminesans ölçümleri	39
5. SONUÇ	41
KAYNAKLAR	42
ÖZGEÇMİŞ	46

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Al _{0,47} Ga _{0,53} N Schottky Fotodetektörün şematik yapısı.....	32
Çizelge 4.2. Tavlama sıcaklığına karşı RMS değerleri.....	38

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Planar difüzyon teknolojisi ile geliştirilmiş fotodiyodun yapısı.....	9
Şekil 2.2. Schottky kontağın enerji-bant diyagramı (a) Kontakta önce, metal ve yarıiletkenin enerji-bant diyagramı, (b) Kontakta sonra enerji bant diyagramı.	10
Şekil 2.3. Schottky fotodiyodun yapısı	11
Şekil 2.4. Çığ fotodiyodun yapısı.....	12
Şekil 3.1. MOCVD'nin çalışma prensibi	16
Şekil 3.2. MBE büyüme çemberinin şematik gösterimi	17
Şekil 3.3. Bir yarı sonsuz kristalin en üst atomik tabakalarının durulması (a) normal durulma (b) yanal durulma.	19
Şekil 3.4. Yeniden yapılanma türlerinin şematik gösterimi (a) ve (c) korunan yeniden yapılanma. (b) ve (c) korunmayan yeniden yapılanma	20
Şekil 3.5. AFM'in şematik gösterimi	24
Şekil 3.6. Uç ile örnek arasındaki van der Waals kuvvetinin atomlar arası mesafeye bağlılığı ve kontak mod, non kontak mod gösterimi	25
Şekil 3.7. Fotoluminesans ölçümlerinde kullanılan deneysel düzenek.....	28
Şekil 3.8. FL ölçümlerinde gerçekleşen fiziksel olayların şematik gösterimi	29
Şekil 4.1. Tavlama işlemi öncesi numunenin yüzeyi üzerinden alınan 2x2 μm^2 b) 5x5 μm^2 tarama alanlı AFM görüntüleri	33
Şekil 4.2. Tavlama işlemi öncesi numunenin yüzeyi üzerindeki teras genişliği b) step yükseklik farkı.....	34
Şekil 4.3. Numunenin 700 °C'ye tavlama işleminden sonraki 2x2 μm^2 b) 5x5 μm^2 tarama alanlı AFM görüntüleri	35
Şekil 4.4. Numunenin 800 °C'ye tavlama işleminden sonraki 2x2 μm^2 b) 5x5 μm^2 tarama alanlı AFM görüntüleri	36

Şekil	Sayfa
Şekil 4.5. Numunenin 900 °C'ye tavlama işleminden sonraki 2x2 µm ² b) 5x5 µm ² tarama alanlı AFM görüntüleri	37
Şekil 4.6. Numunenin 950 °C'ye tavlama işleminden sonraki 2x2 µm ² b) 5x5 µm ² tarama alanlı AFM görüntüleri	38
Şekil 4.7. Tavlama sıcaklığına göre PL grafiği.....	40

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
E	Enerji
h	Planck sabiti
ν	Frekans
λ	Dalga boyu
I	Akım
f	Frekans
F	Işın şiddeti
U_F	Fotoalıcıya uygulanan gerilim
L	Spektrum ile ilgili birim
E_g	Yasak enerji aralığı
c	Işık hızı
F	Kuvvet
P	Basınç
V	Gerilim
Kısaltmalar	Açıklama
AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
PL	Fotoluminesans
MBE	Moleküler demet epitaksi
MOCVD	Metal organik kimyasal buhar birikimi
LEED	Düşük enerjili elektron kırınımı
RHEED	Yansımali yüksek enerjili elektron kırınımı

Kısaltmalar**Açıklama**

STM	Taramalı tünelleme mikroskobu
XSW	Durağan dalgalı X-ışınları
PhD	Fotoelektron kırınımı
PS	Fotoelektron spektroskopu
UPS	Morötesi fotoelektron spektroskopu
XPS	X-ışını fototelektron spektroskopu
LDR	Işığa bağımlı direnç
UHV	Çok yüksek vakum
RMS	Yüzey pürüzlülük değeri
TMG	Trimetilgalyum
TMA	Trimetilaliminyum
TMI	Trimetilindiyum

1. GİRİŞ

Katılar, elektrik iletim kabiliyetlerine göre iletkenler, yarıiletkenler ve yalıtkanlar olarak üç gruba ayrılabilir. Katıların bant teorisi bu farkı açıklar. Elektronlar en düşük enerji seviyesinden başlayarak üst seviyelere doğru enerji seviyelerini doldururlar. Bununla birlikte katıdaki atomların dalga özelliklerinden dolayı bazı enerji seviyeleri yasaktır. İzinli enerji seviyeleri bant oluştururlar. Yasak enerji aralığının üstündeki banda iletkenlik bandı, altındaki banda valans bandı denir. Metallerde iletkenlik bandıyla valans bandı kısmen çakışmıştır, bu durum iletme katılan serbest elektronların oluşmasını sağlar. Yalıtkanlarda yasak enerji aralığı elektronun termal enerjisinden çok daha büyüktür. Yarıiletkenlerde ise yasak enerji aralığı 1 eV civarındadır [1].

Yarıiletkenlerin en önemli özelliklerinden biri; iletkenliklerinin, iletkenlerle yalıtkanlar arasında olması ve sıcaklık artışıyla artmasıdır. Diğer bir önemli özelliği de yarıiletken içerisindeki yabancı madde konsantrasyonunun artmasıyla iletkenliğinin de artmasıdır. Bu gibi özellikler yarıiletkenlerin, yüklerin aktığı ve kontrol edilebildiği yapıların yapımında kullanılmasını sağlamıştır.

Saf bir yarıiletkende valans bandında bulunan elektronların ışık, sıcaklık ve basınç gibi etkenlerle iletim bandına geçmesiyle elektriksel iletim gerçekleşmiş olur. Yarıiletkenlerde valans bandında bulunan elektronların, yasak enerji büyüklüğünde enerji kazanarak iletim bandına geçmesiyle valans bandında bıraktıkları boşluklara deşik adı verilir. Deşikler pozitif yüklü tanecikler gibi davranır ve elektronlara zıt yönde hareket ederler. Bu nedenle yarıiletkenlerde elektron ve deşik olmak üzere iki tür taşıyıcı vardır [2].

Yarıiletkenlerin 1948 yılında Bell Telephone laboratuvarında transistör yapımında kullanılmasından sonra yarıiletken transistörler, elektronikte elektron tüplerinin yerini almıştır. Katıhal elektronüğünün 1950-1960 yılları arasındaki ilk gelişme döneminde araştırmalar daha çok temel devre elemanları üzerine olmuştur. Bu dönemde yarıiletken olarak silisyum ve germanyum önemli ölçüde kullanılmış ancak

zaman içinde silisyumun kullanımı daha yaygınlaşmıştır. Bunun sebebi silisyum transistorlerin eklem sıcaklığı 125-200°C aralığındayken germanyum için bu sınır değer 60-100 °C aralığındadır, ayrıca silisyumun doğada bol miktarda bulunması ve kristal yüzeyinde SiO₂ gibi tabii bir yalıtkan tabakanın elde edilebilmesidir. 1960 sonrası silisyum dioksit kullanılarak alan etkili transistörler ve entegre devrelerin yapılması mümkün olmuştur. Çok hızlı gelişen elektronik teknolojisinde silisyumun artan taleplere cevap veremez duruma gelmesi araştırmacıları yeni yarıiletkenler oluşturmaya zorlamıştır [3].

1980'li yıllara kadar yapay kristallerin büyütülmesindeki yetersizlikler nedeniyle Si, Ge, gibi yarıiletkenler üretilebilmiştir. Daha sonraları MBE ve MOCVD gibi kristal büyütme teknikleri sayesinde birkaç atomik tabakalı düşük boyutlu sistemlerin kaliteli bir şekilde üretilebilmesi mümkün olmuştur [2].

Bileşik yarıiletken materyaller ve aygıtlar son yıllarda bilim adamları tarafından üzerinde yoğun çalışmalar yapılan bir araştırma konusu olmuştur. Özellikle III-V grup bileşik yarıiletkenlerin çeşitli sentezleri elektronik ve optik uygulamalarda ender bulunan önemli özelliklere sahiptir. Bu yarıiletkenler ve ilgili alaşımları ticari, askeri ve tüketim elektroniğinin ihtiyacı olan talepleri karşılamaktadır [3].

III-V grup bileşik yarıiletkenler yüksek hızlı elektronik ve optoelektronik devrelerde üstün performans gösterir. Bu yarıiletkenlerin silisyuma nazaran sahip oldukları, yüksek elektron mobilitesi, yüksek sürüklenme hızı, direk band yasak enerji aralığı bu yarıiletkenlere, çok çeşitli heterojen yapıların üretiminde avantajlar sağlar [4]. Örneğin GaN, AlN, InN gibi III-V grup bileşik yarıiletkenler; mavi/yeşil ışık yayan diyotlarda ve lazer diyotlarda temel materyal olarak kullanılması yanı sıra yüksek güç, yüksek voltaj ve yüksek sıcaklık cihaz uygulamaları için çok önemli bileşik yarıiletkenlerdir [5, 6].

Görüldüğü gibi yarıiletkenler, günümüz teknolojisinde özellikle modern elektronik teknolojisinde çok önemli bir yere sahiptir. Yarıiletken maddelerden yapılan aygıtlar

arasında transistör, diyotlar, fotovoltaiik piller, dedektörler ve termistörler sayılabilir. Bu aygıtlar devre elemanı olarak tek başlarına veya entegre devrelerin bir parçası olarak kullanılmaktadır [4].

Yarıiletkenler doğada saf olarak bulunmazlar ancak çeşitli kristal büyütme teknikleri kullanılarak yapay olarak büyütülebilirler. Bu tekniklerden en önemli ikisi MBE (Molecular Beam Epitaxy) ve MOCVD (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition) teknikleridir. MBE, özellikle araştırma laboratuvarlarında tercih edilen bir tekniktir. Ancak ticari uygulamalar açısından seri üretim yapan MOCVD tekniği kullanılmaktadır [7].

Günümüzde bu kristalleri üretmek büyük önem taşımaktadır, ancak üretilen kristallerin elektrik, optik ve yüzey karakterizasyonlarını yapmak suretiyle yeni üretilen yarıiletkenlerin üretim parametreleri değiştirilerek farklı özelliklere sahip kristaller üretmek mümkün olmaktadır. Bu durumda bir kristali büyütme kadar o kristalin karakterizasyonunda büyük önem taşımaktadır [3].

1980'li yıllardan günümüze yüzey çalışmaları için çeşitli deneysel teknikler geliştirilmiştir. Yapısal bilgi elde etmek için kullanılan deneysel teknikler iki ana grupta toplanabilir: (i) yeniden yapılanma biçimi için Düşük Enerjili Elektron Kırınım (LEED), Yüksek Enerjili Elektron Yansıma Kırınımı (RHEED), Taramalı Tünellemeli Mikroskop (STM) kullanılarak ve (ii) atomik bilgi için LEED, STM, Durağan Dalgalı X-ışınları (XSW), Fotoelektron Kırınımı (PhD) ve iyon saçılması kullanılarak elde edilebilir. Yüzey elektronik durumları fotoemisyon spektroskopisi (PS) ve onun türevleri olan: Ultraviyole PS (UPS), X-ışını PS (XPS) ile haritalanabilir. Aynı zamanda STM tekniği de yüzey elektronik durumlarını araştırmak için kullanılabilir. Yüzey kimyasal kompozisyonu Auger Elektron Spektroskopisi (AES) kullanılarak elde edilebilir [8].

Gurup-III Nitrit yarıiletkenleri direkt geçişli geniş bant aralığına sahip olduğundan kullanım alanı oldukça geniştir [9]. III-V nitritlerler gibi, geniş bant aralıklı AlGaN ve SiC yarıiletkenleri üzerinde yapılan araştırmalar optoelektronik aygıtlar için

birçok gelişmeye yol açmıştır. Son yıllarda GaN ve AlGaN yarıiletkenleri; alev algılama, füze tespiti, morötesi biyolojik etki, morötesi astronomi, makine motor kontrol, uzay ve denizaltı haberleşmesi, ozon tabakasının durumunu kontrol etme, yangın alarmları, gaz algılama gibi UV fotodedektörleri için önemli araştırma konusu olmuştur. UV fotodedektörleri güneş-körü dedektörler olarak da adlandırılırlar ve çok zayıf UV sinyalleri bile algılayabilirler. Geniş bant aralıklı bu tip yarıiletkenlerden yapılan optoelektronik aygıtların birçok üstünlüğü; yüksek güç ve yüksek sıcaklıkta bile çalışmasına imkan veren ısıl ve kimyasal denge (stability) üstünlüğünden kaynaklanır [10, 11]. Örneğin $Al_x Ga_{1-x} N$ alaşımları, 3.4eV (GaN) ile 6.2eV (AlN) arasında değişen direk geniş bant aralığına sahiptir. $Al_x Ga_{1-x} N$ alaşımlarının bu özelliği, ultraviyole optoelektronik aygıtların yapımı için çok uygundur [12]. Ayrıca Metal-yarıiletken alan etkili transistörler ve diyotlar gibi birçok elektronik aygıt için Schottky kontak çok önemlidir. Bunun nedeni Schottky kantağın yarıiletken yüzeylerin elektronik özelliğine çok duyarlı olmasıdır [13].

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 için kullanılır [7].

Bu tez çalışmasında MOCVD kristal büyütme tekniğiyle büyütülen $Al_{0.47}Ga_{0.53}N$ Schottky Fotodedektör yapının, oda sıcaklığında ve 700, 800, 900, 960 °C'de tavlama sıcaklıklarındaki AFM ve PL ölçümleri alınarak sıcaklığa bağlı olarak morfolojiksel ve optiksel özelliklerinin değişimi incelenmiştir. AFM ölçümlerinden, yüzey pürüzlülüğünün tavlama sıcaklığına bağlı olarak önemli ölçüde azaldığı, ancak tavlama sıcaklığı arttıkça sürekli olarak azalmadığı görülmüştür. Yapılan AFM ölçümlerinden yüzey pürüzlülüğünün en az olduğu tavlama sıcaklığı 800 °C'de olduğu görülmüştür. Yüzey ve ara yüzeylerden alınan PL ölçümlerinde, artan tavlama sıcaklığı ile PL piklerinin şiddetinin arttığı gözlenmiştir.

Tez çalışmasında kullanılan $Al_{0.47}Ga_{0.53}N$ numunesi Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezinde bulunan MOCVD cihazı ile büyütülmüştür. Numunenin optik ve morfolojik özellikleri ise, Gazi Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Yarıiletken İleri Teknoloji Laboratuar'ında AFM ve PL cihazları kullanılarak ölçülmüştür.

2. FOTODEDEKTÖRLER

Günümüz teknolojisinde çok önemli olan optoelektronik aygıtlar; ışık kaynakları, modülatörler, gösterge aygıtları, haberleşme sistemleri ve dedektörler gibi aygıtlardır [14]. Bu aygıtlar içerisinde olan optik dedektörler iki kısma ayrılır. Bunlar ısı ve foton dedektörleridir. Isıl dedektörlerde ışığın soğurulması aygıtın sıcaklığını yükseltir ve böylece sıcaklığa bağlı olan parametrelerde bazı değişimler gerçekleşir. Bu değişime örnek olarak elektriksel iletkenlik verilebilir. Isıl dedektörlerinin çıkışı, eğer soğurma veriminin bütün dalga boylarında eşit olduğu kabul edilirse, ışığın dalga boyundan bağımsızdır ve dedektör tarafından birim zamanda soğurulan enerji miktarıyla orantılıdır. Ancak foton dedektörlerinde soğurma işlemi bir dizi kuantum olayıyla gerçekleşir. Örnek olarak bir yüzeyden elektronların salınması verilebilir. Dolayısıyla foton dedektörlerinin çıkışı, ışık taneciklerinin soğurulma oranıyla doğrudan ilişkilidir. Aynı zamanda burada ele alınan bütün foton işlemleri kendilerini başlatacak belirli bir minimum foton enerjisine ihtiyaç duyarlar. Bir tek fotonun enerjisi $E = h\nu/\lambda$ eşitliği ile verilir.

Kızıl ötesinde çalışan foton dedektörlerinde en sık karşılaşılan problem, soğurulan foton enerjilerinin, dedektörün kendisinde bulunan atomların ortalama ısı enerjileriyle ($\cong k.T$) karşılaştırılabilir hale gelmesidir. Böyle bir durumda meydana gelen elektron salınımları ışığın soğurulmasının yanında, ısı uyarmayla da üretilmiş olur. Bunun sonucunda ise bir gürültü kaynağı meydana gelir. Bu gürültü sinyalinin azaltılması için kolay bir yol dedektörün sıcaklığını azaltmaktır. Örneğin $3\mu\text{m}$ veya üzerinde bir dalga boyunda çalışan birçok foton dedektörü sıvı azot sıcaklığına yani 77 K veya daha aşağısına soğutulması gerekir [15].

Cıvalı termometrelerden sonra ısı dedektörlerde ilk gelişme termoelektrik etkinin avantajından yararlanan termopil olmuştur. İki farklı metalin birleşmesiyle oluşan termokupl'un iki ucu arasında sıcaklık farkı olduğunda, sıcaklık farkıyla orantılı bir voltaj meydana gelir. Daha sonraları ise golay hücresi, pyroelektrik dedektör, bolometre gibi ısı dedektörler geliştirilmiştir. Golay hüresi; az miktarda gazın ince metal film ile temasından oluşur. İnce metal film, ışığı soğurarak ısınır ve ısı gaza

iletilir. Isınan gazın basıncı hücre içerisindeki aynanın açısını değiştirerek, yansıtılan ışık optik yükseltece yöneltmiş olur. Pyroelektrik dedektör içerisindeki soğurucu materyalin dielektrik sabitinin, sıcaklığın artması ya da azalması sonucunda değişimine neden olur. Pyroelektrik materyal kutuplanmış kapasitör içinde bulunur. Kapasitör, materyalin dielektrik sabitinin değişimiyle orantılı olan akımı sağlar. Kapasitansın değişimi elektrik sinyaline çevrilir. Bolometreler sıcaklık değişimi ile elektriksel direnci değişen kızılötesi ısı dedektörleridir. Kızılötesi ışıma soğurularak materyalin sıcaklığı değişir. Değişen sıcaklık ile bolometre içerisinde gecen akım da değişir [16].

Bir fotodedektör, yasak enerji aralığından daha büyük enerjili fotonları soğurarak elektron-deşik çiftleri meydana getirir. Bunun sonucunda ise dış devreden akım akar [17]. Bir başka ifadeyle fotodedektör; optiksel enerjiyi soğuran ve bu enerjiyi elektriksel enerjiye dönüştüren optoelektronik bir ayardır. Fotodedektörler optiksel spektrumun çok geniş bir alanına karşılık gelen optiksel sinyalleri algırlar [13]. Fotodedektörler teknolojiye oldukça geniş bir uygulama alanına sahiptir. Özellikle optiksel iletişim sistemlerinde çok geniş çapta kullanılmaktadır. İyi bir fotodedektörün sahip olması gereken önemli özellikler; yüksek duyarlılık, yüksek cevaplama hızı, düşük gürültü, yüksek güvenilirlik ve düşük maliyettir [1, 18].

Fotodedektörün ışığa duyarlı yüzeyine bir ışık düşerse, bu ışık ile oluşan foto akım,

$$I_F = f(F, U_F, L, \theta) \quad (2.1)$$

eşitliğinde görüldüğü gibi dört parametreye bağlıdır. Burada F ışın şiddeti, L spektrum ile ilgili birim, U_F fotoalıcıya uygulanan gerilim, θ açıdır. Genelde optoelektronikte kullanılan fotodedektörler; yukarıda belirtildiği gibi fotodirençler, fotodiyotlar, fototranzistörlerin, yanında fototristörler ve fototriyaklardır.

Fotodirençler; ışın şiddeti ile dirençleri değişen optoelektronik devre elemanlarıdır. Bir fotodirençin üzerine ışık düşerse ışığın seviyesine göre fotodirençin iletkenliği ya

da direnci değişir. Işığa duyarlı bir malzemenin iletkenliği, sahip olduğu yüklü taşıyıcıların yoğunlu ile orantılıdır. Fotodirencin üzerine ışık düştüğünde, ışık ile gelen bu enerji kovalent bağların kopmasına ve kovalent bağların kopması ise elektron- deşik çiftlerinin sayısının artmasına neden olur. Sonuç olarak sayısı artan akım taşıyıcıları fotodirencin direncini azaltır.

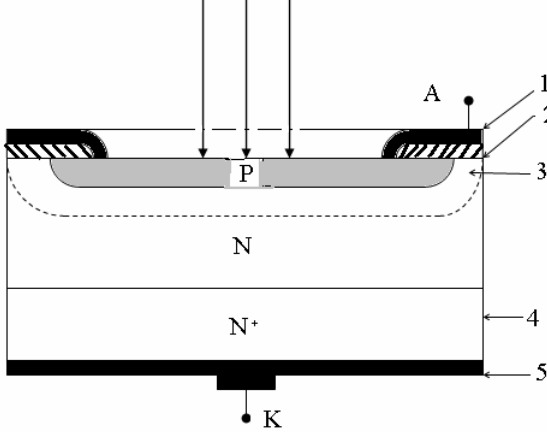
Yeterince enerjiye sahip bir foton, bir elektron-deşik çifti meydana getirebilir. Bu olaya has uyarma denir. Bir fotonun has uyarmayı gerçekleştirebilmesi için, fotonun sahip olması gereken minimum enerji değeri, yarıiletken malzemenin yasak enerji bant genişliği kadardır. Burada yarıiletken malzemenin eşik dalga boyu, yasak enerji aralığına karşı gelen dalga boyu olarak tanımlanır. Fotodirençler seçilen malzemeye göre görünen ışık ve kızılötesi spektruma duyarlı olarak üretilirler. Duyarlı olduğu spektrumun çok geniş olması fotodirençlerin kullanım alanını genişletmektedir. Fotodirençler yüksek duyarlılıklarının yanı sıra yüksek gerilimlerde de çalışabilir. Fotodirençlerin dezavantajları ise sıcaklığa olan duyarlılıklarıdır [19].

Fotodiyotlar; ışığı geçiren bir muhafaza içine yerleştirilmiş veya yarıiletken bağlantısı bir optik mercek altına yerleştirilmiş normal bir silikon diyottur. Bir başka deyişle ışığa duyarlı, P-N jonksiyonuna sahip yarıiletken diyotlardır. Fotodiyodun işlevi ışık şiddetini elektriksel işarete en etkili şekilde çevirmektir. Fotodiyodun ışığa duyarlı yüzeyine ışık düşürülerek fotonların emilmesi sağlanır böylece serbest taşıyıcılar oluşur, bu serbest taşıyıcıların sayesinde ise akım meydana gelir [19, 20].

P-N jonksiyonunda N tipi yarıiletken bölgesinde elektronlar, P tipi yarıiletken bölgesinde ise deşikler fazladır. Elektronlar ve deşikler hareketli olduklarından ve zıt yüklü olduklarından jonksiyonun birleşme bölgesinde birbirlerine doğru hareket ederek birbirlerini nötür ederler. Böylece birleşme bölgesinde taşıyıcılar oldukça azalır ve bu bölgede zıt polariteli iyonlaşmış atomlar kalır. Bu iyonlaşmış atomlar, serbest taşıyıcıların bir bölgeden diğer bölgeye geçişini engeller, yani potansiyel bariyer (duvar) gerilimi oluştururlar. Bariyer gerilimin büyüklüğü, fotodiyodun yapımında kullanılan yarıiletken malzemenin özelliğine bağlıdır. Örneğin silikon için

bariyer gerilimi $U_0 = 0.7V$ 'tur. Uygulanan gerilimin yönüne göre fotodiyot iletim ve tıkama eğiliminde olabilir. P-N jonksiyonuna doğru gerilim uygulandığında taşıyıcıların az olduğu bölge daralır ve jonksiyonun iletkenliği artar. Uygulanan doğru gerilimin büyüklüğü P-N jonksiyonunun bariyer geriliminin büyüklüğüne ulaştığında taşıyıcıların az olduğu bölge ortadan kalkar ve P-N jonksiyonu iletme geçer. P-N jonksiyonuna ters yönde bir gerilim uygulandığında ise taşıyıcıların az olduğu bölge genişler ve P-N jonksiyonunun iletkenliği azalır. Buna rağmen ters yönde gerilimde de yine bir miktar akım akar. Bu akım, ortam ısısının ya da diğer ışık kaynaklarının etkisiyle oluşan serbest taşıyıcıların akımıdır.

En çok kullanılan fotodiyotlardan bazıları; planar, çığ ve schottky fotodiyotlarıdır. Fotodiyotların karakteristik özellikleri, fotodiyodun yapımında kullanılan yarıiletken malzemenin cinsi ve dizaynına göre belirlenir. Planar difüzyon teknolojisi ile üretilmiş ve en çok kullanım alanına sahip fotodiyottur [20].

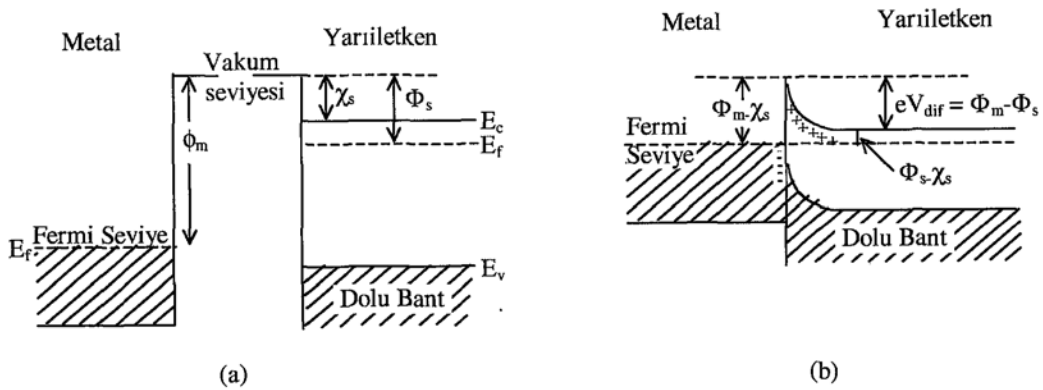


Şekil 2.1. Planar difüzyon teknolojisi ile geliştirilmiş fotodiyodun yapısı 1- Kontak
2- SiO_2 tabakası 3- Taşıyıcılar bakımından boşalmış bölge 4- Katkı yoğunluğu fazla olan bölge 5- Taban kontak

Şekil 2.1'de fotodiyodun üst kısmında fazla katkılanmış P tipi bölge ve P tipi bölgenin altında daha az katkılanmış N tipi bölge bulunur. Bu iki katkı yüzeyi arasında taşıyıcı bakımında fakir bölge yer alır. Katkı yoğunluğu farkından dolayı taşıyıcı bakımından fakir olan P tipi bölge, N tipi bölgeye göre daha derin olur.

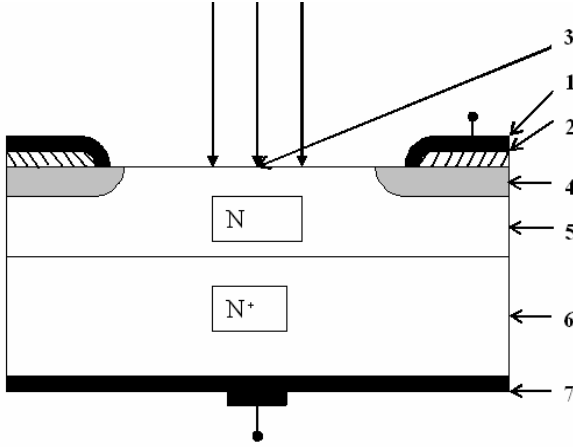
Fotodiyodun üst kısmı SiO_2 ile kaplanmışır. Fotodiyodun alt kısmında N^+ tipli yarıiletken bölge bulunur ve fotodiyodun metale olan bağlantısını sağlar.

Fotodiyodun üzerine düşen ışının yarıiletken malzemenin içinde ilerlemesi ışının dalga boyuna bağlıdır. Düşük dalga boyuna sahip morötesi gibi ışınlar yüzeyde emilerek yapı içerisinde ilerleyemezler. Kızılötesi gibi uzun dalga boylu ışınlar yapı içerisinde derinlere kadar ilerleyebilirler. Buradan da anlaşılacağı gibi geniş cevap alanına sahip fotodiyot için, ince bir P tabakasına ve kalın bir zayıflamış bölgeye ihtiyaç vardır. Fotodiyodun cevap hızı, taşıyıcı bakımında zayıflamış bölgenin kalınlığına ve fotodiyot üzerine uygulanmış ters polariteli gerilim tarafından belirlenmektedir. Zayıflamış bölgenin kalınlığını N tipi bölgenin katkı yoğunluğu belirler. Düşük katkı yoğunluğu zayıflamış bölgenin kalınlığını artırır ve fotodiyodun kapasitesini düşürür [20].



Şekil 2.2. a) Kontakt yapılmadan önce, metalin ve yarıiletkenin enerji-bant diyagramı
b) Schottky kontağın enerji-bant diyagramı

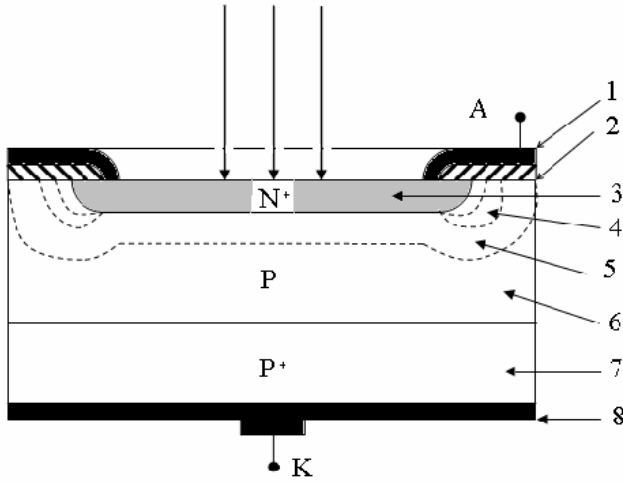
Schottky diyot bir metal-yarıiletken kontağından oluşur. Şekil 2.2a'da kontakt yapılmadan önceki yarıiletkenin fermi seviyesinin, metalin fermi seviyesinden $\Phi_m - \Phi_s$ kadar yukarıda olduğu görülmektedir. Kontakt yapıldıktan sonra meydana gelen yük alışverişi metal ve yarıiletkenin fermi seviyelerini aynı düzeye getirir. Şekil 2.2.b'de yarıiletkenin enerji seviyelerinin, iş fonksiyonlarının farkı kadar azaldığı görülmektedir. Burada Φ_m metalin iş fonksiyonu, Φ_s yarıiletkenin iş fonksiyonudur [21, 22].



Şekil 2.3. Schottky fotodiyodun yapısı 1- Kontak 2- SiO₂ tabakası 3- İnce altın kaplamalı saydam tabaka 4- Yarı izole edilmiş bölge 5- N tipi katkı bölge 6- Katkı yoğunluğu fazla olan bölge 7- Taban kontaktır

Şekil 2.3’de görüldüğü gibi kalınlığı 10 nm’den az olan ince saydam altın tabaka N tipi yarıiletkenin üstünde bulunur. Schottky fotodedektöründe zayıflamış bölge çok incedir. Dolayısıyla cevap hızı yüksektir [20]. Schottky fotodiyodu’nun diğer bir üstün özelliği ise metal tabakanın ince olmasından dolayı, mavi ve yakın morötesi radyasyonu geçirebilmesi sayesinde duyarlılığın artmasıdır [15].

Çiğ fotodiyodu iç kazanç mekanizmasına sahip jonksiyonlu fotodiyottur. Çiğ fotodiyodun çalışabilmesi için ters polariteli gerilim uygulamak gerekir. Fotodedektöre gelen fotonlar tarafından elektronların iletkenlik bandına geçmesi sağlanır. Yüksek elektrik alanından dolayı elektronun diğer atomlara çarpması ile çok sayıda elektron deşik çifti oluşur. Bu olay sonucunda çoğullanma meydana gelir. Burada elektronların rastgele çarpışmasından shot gürültü oluşur ama oluşan bu gürültü, uygun sinyal/gürültü oranı ayarlanarak güvenli çalışma sağlanır. Akım kazancı, uygulanan ters gerilime ve jonksiyonun geometresine bağlıdır. Fotodiyodun kararlı bir şekilde çalışabilmesi için, uygulanan ters gerilimin değerinin de kararlı olması gerekir. Maksimum kazanç ısı ile oluşan taşıyıcılar tarafından sınırlanır.



Şekil 2.4. Çığ fotodiyodunun yapısı 1-Kontak 2- SiO_2 tabakası 3- Katkılanmış N tipi bölge 4- Hafif katkılanmış koruma tabakası 5- Taşıyıcılar bakımından zayıflamış bölge 6- P tipi bölge 7- Ek tabaka 8- Taban kontak

Şekil 2.4'de çığ fotodiyodunun yapısı gösterilmiştir. Çığ fotodiyodu içinde oluşan iç kazanç, bu fotodiyotların yüksek hızlı iletişim ve fiber-optik teknolojisinde sıkça kullanılmasını sağlamıştır.

Fotodiyotlar kararlı devre elemanlarıdır. Sıcaklık katsayıları dalga boyu ile değişmekle birlikte tepe dalga boyunda sıcaklık katsayıları çok düşük olur. Bu özellikte fotodiyodun meteoroloji de kullanılmasını sağlar.

Fotodiyotlar ultraviyole bölgesinden kızılötesi bölgesine kadar olan geniş bir spektrum aralığında kullanılabilirler. Fotodiyodun ışın spektrumundaki çalışma bölgesi, fotodiyodun yapımında kullanılan yarıiletken malzemeye, jonksiyonun dizaynına ve diğer malzemelerin cinsine bağlıdır. Düşük optik sinyal seviyelerinde fotodiyot kullanılırken gürültünün önemi artar. Jonksiyonlu olan fotodiyotlarda shot gürültü ve ısı gürültü olmak üzere iki önemli gürültü vardır. Shot gürültü yüksek optik sinyal seviyelerinde, ısı gürültü ise düşük optik sinyal seviyelerinde yer alır [20].

Fotoiletken dedektörler; yarıiletkenin bant aralığına uygun dalga boyuna sahip ışık için dedektör görevini görür. Yarıiletkenin yasak enerji aralığına eşit ya da daha büyük enerjiye sahip bir fotonun soğrulması ile valans bandında bulunan bir elektron

iletkenlik bandına geçebilir. Burada bahsedilen ν frekanslı bir fotonun enerjisi ile yasak enerji aralığı (E_g) arasındaki bağıntı,

$$h\nu \geq E_g \quad (2.2)$$

İfadesi ile verilir. Bant aralığına karşılık gelen dalga boyu λ_g , bu geçişi sağlayabilecek en küçük değer olarak tanımlanır. Bu dalga boyu,

$$\lambda_g = \frac{hc}{E_g} \quad (2.3)$$

şeklinde tanımlanır. Burada h Planck sabiti, c ışık hızıdır. Elektron iletim bandında kaldığı sürece, yarıiletkenin iletkenliğinde bir artış sağlayacaktır. Bu, fotoiletkenlerde işlev gören temel mekanizma olan ‘fotoiletkenlik’ olgusudur [15, 23].

Fototranzistörlerin çalışması, akımın fotonlar tarafından gerçekleştirilmesinin dışında N-P-N ve P-N-P silikon tranzistorlerin çalışmasına benzemektedir. Yani fototranzistörler, ışıkla kollektör-emetör akımı kontrol edilen optoelektronik bir ayardır. Fototranzistörler, algılama yanında kuvvetlendirme işlevini de gerçekleştiren fotodedektörlerdir. Planar, Schotky ve çığ fotodiyotlarının, algılaması (hissediciliği) lineerlik ve yükselme süresi yönünden fototranzistörlerden daha üstündür. Fototranzistörlerinin avantajı, kazanç mekanizmasına sahip olduğundan yüksek cevap hızına sahip olmasıdır. Diğer avantajları ise maliyetinin ucuz olması, devrede anahtar ve kontrol elemanı olarak da kullanılabilmesidir. Bir fototranzistörün duyarlı olduğu spektrum, yapımında kullanılan malzemenin uyarma enerjisine (elektronları koparmak için gerekli olan enerji) bağlıdır. Diğer etkenlerin spektruma etkisi çok azdır.

Fototristörler: iki transistörün bağlantısıyla oluşturulan, üç P-N jonksiyonuna sahip optoelektronik devre elemanıdır. Işığa duyarlı yarıiletkenin üzerine ışığın uygulanmasıyla kontrol edilir. Fototristörler çoğunlukla elektronik devrelerde

anahtar olarak kullanılır. Fototristörler tek yönde akım geçirirler. Işık etkisinde bir diyot gibi davranır. Ancak fototristörün kapanması için ya anot ile katot arasındaki gerilim sıfır yapılır ya da gerilimin polaritesi değiştirilir. Burada kontrol eden ışık, fototristörü sadece iletme geçirir eğer anot ile katot arasındaki gerilim değişmez ise ışığın etkisi ortadan kalkar. Bu yüzden fototristörler AC (alternatif akım) devrelerde kullanılır. Çünkü bu devrelerde anot ve katot arasındaki gerilimin polaritesi periyodik olarak değişir bunun sonucunda fototristör otomatik olarak kapanabilir. Fototransistörlere göre fototristörler daha yüksek gerilim ve daha yüksek akımlarda çalışabilmektedir.

Fototriyaklar; üç P-N jonksiyonuna sahip fotodedektörlerdir. Fototristörlerden farkı iki yönde de akım geçirebilmesidir. Fototriyaklar AC devrelerde kullanıldığında pozitif ve negatif polariteli yarı dalgaları geçirebilirler. Işık kontrollü fototristörler ve fototriyaklar endüstride anahtar olarak kullanılabilirler. Fototristörler ve fototriyaklar kullanılarak, mW'lar mertebesinde bir güç ile kW'lar mertebesindeki güç kontrol edilebilir [20].

3. DENEYSEL TEKNİKLER

Günümüzde, üretilen kristallerin elektrik, optik ve yüzey karakterizasyonlarını yapmak suretiyle yeni üretilecek yarıiletkenlerin üretim parametreleri değiştirilerek farklı özelliklere sahip kristaller üretmek mümkün olmaktadır. Bu durumda bir kristali büyütmek kadar o kristalin karakterizasyonunda büyük önem taşımaktadır [3]. Çok sayıda güçlü deneysel teknikler yarıiletkenlerin atomik, elektronik, ve kimyasal bağ yapılarını belirlemekte kullanılmaktadır [8]. Bu bölümde optik karakterizasyon yöntemlerinden PL (fotoluminesans) ve yüzey karakterizasyon yöntemlerinden olan AFM (atomic force microscopy) deneysel tekniklerinden söz edilecektir. Ama öncelikle kristal büyütmeye teknikleri ve yüzey karakterizasyonu yapılacak olan yarıiletken kristalin, yüzeyinin temizlenmesi işlemi anlatılacaktır.

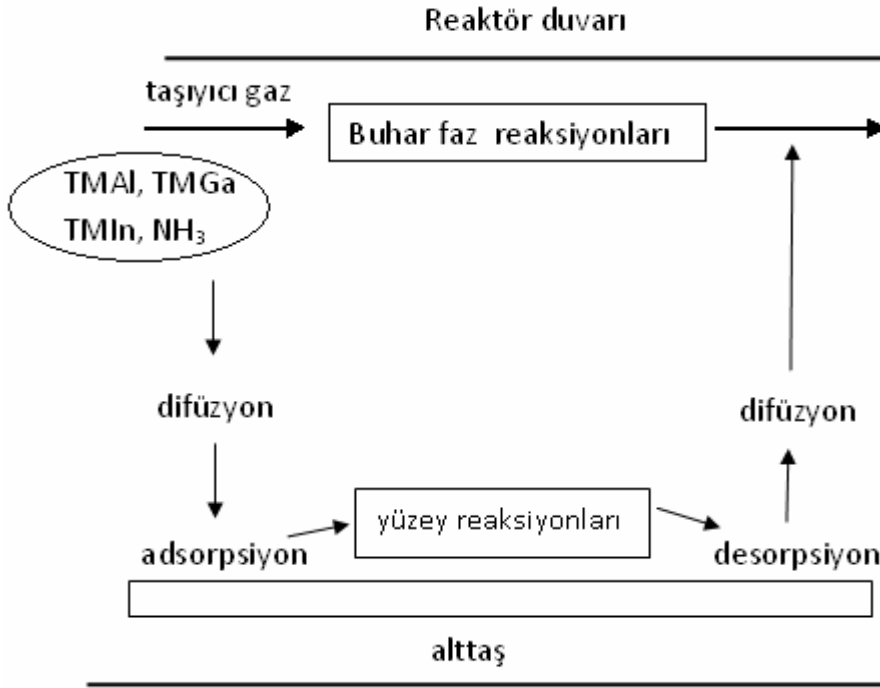
3.1. Kristal Büyütme Teknikleri

Epitaksi, alttaş denilen tek kristal üzerine kalınlığı ve katkısı kontrol edilerek yönelimli tek kristalin büyütülmesidir. Epitaksi yüksek kalitede kristal üretmek için kullanılmaktadır. MOCVD ve MBE, en yaygın kullanılan epitaksiyel büyütmeye teknikleridir [24].

3.1.1. Metal organik kimyasal buhar depozisyonu

Buhar faz epitaksi (VPE), kimyasal buhar depozisyonu (CVD) olarak da adlandırılır ve kristal büyütmeye teknikleri içerisinde en çok kullanılan tekniktir. III-V grubu yarıiletkenler ve diğer bileşik yarıiletkenlerin büyütülmesinde üç farklı CVD tekniği kullanılmıştır. Bu teknikler; halojenür yöntemi, hidrit yöntemi ve metal organik kimyasal buhar depozisyonu tekniğidir [24]. MOCVD, yüksek performanslı cihazların yapımı için gerekli olan yüksek kristal kaliteye sahip belirli katkı konsantrasyonu ve materyallerin farklı tabakalarını içeren heteroyapıların büyütülmesinde önemlidir [25]. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi MOCVD tekniğinde ısıtılmış alttaş üzerine kaynak malzeme gönderilir. Kaynak gaz moleküllerinin

karışımı ısıtılmış yüzeyde ayrışarak istenilen gaz molekülleri yüzeyde tutulur, diğer gaz molekülleri ise yüzeyden saçılır.



Şekil 3.1. MOCVD'nin çalışma prensibi [26].

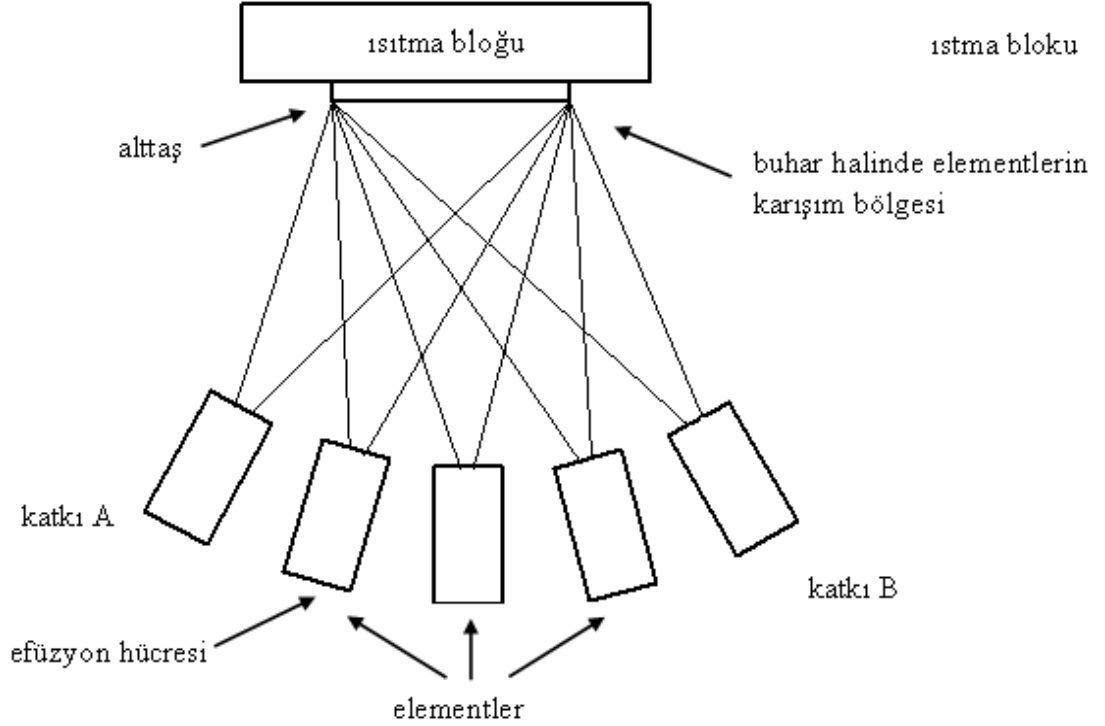
MOCVD tekniği ile safir alttaş üzerine AlGa_N tabakaların büyütülmesinde; taşıyıcı gaz olarak hidrojen, metal organik kaynak olarak trimethylaluminium (TMAI), trimethylgallium (TMGa) ve amonyak (NH₃) kullanılır [27].

3.1.2. Moleküler demet epitaksi

MBE atom ve molekül demetlerinin büyütülmüş yüzey üzerinde birikmesiyle oluşan bir ince film depozisyonu tekniğidir [28]. Bir başka deyişle MBE, UHV altında bir kristal yüzeyi ile bir veya birden çok termal molekül demetlerin reaksiyonu sonucunda bileşik yarıiletkenlerin büyütülmesi tekniğidir [29]. Yüksek vakum, diğer büyütme metotlarına göre daha az kirlilik birleşmesine neden olur. Efüzyon hücreleri, yarıiletkenlerin katkılanması ve büyütülmesi için elementel materyalleri

sağlar. Örneğin InGaN için elementsel materyaller, grup III elementleri olarak In, Ga, Al kullanılır [28].

MBE tekniğinin diğer ince film teknolojilerinden üstünlüğü depozisyon durumunun ve demet akılarının kontrolünü mükemmel bir şekilde gerçekleştirmesidir. Büyütmede en önemli kontrol alttaşın en dışındaki atomik tabakalar ile etkin demetlerin reaksiyona girmesiyle meydana gelen yüzey oluşumlarının kinetiğinin kontrolüdür. MBE, yüzey yeniden yapılanmanın gözlenmesi ve yüzey fiziğinin detaylı bilgisini vermesiyle yüksek kalitede ince filmlerin üretilmesini sağlar.



Şekil 3.2. MBE büyüme çemberinin şematik gösterimi

MBE sistemi genel olarak üç temel UHV kısımdan oluşmaktadır. Bu kısımlar; büyüme çemberi, büyüme öncesi (transfer) çemberi ve yükleme kilidi (giriş) çemberi. Bu kısımlar, izolasyon valflar ve geniş çaplı kanallar ile birbirine bağlanmış ayrıca birbirinden bağımsız pompalardan oluşur. Şekil 3.2'de MBE tekniği ile büyüme esasen iki basamakta gerçekleşir. İlk basamakta ısıtılmış hücreler içindeki

katı kaynakları buharlaştırılır ve buharlaşmış parçacıklar paralel demetler halinde ısıtılmış alttaş üzerine doğrudan gönderilir. Demetler içindeki parçacıklar ne birbiriyle çarpışır nede reaksiyona girerler, yani bir moleküler akı olarak davranırlar. Düzenli olarak depozisyonu sağlamak için alttaş döndürülür. İkinci basamak alttaş veya bir önceki olan epitaksiyel tabakanın kristal örgüleriyle birleşmesi ve yüzey üzerinde biriken türlerin göçüdür [29].

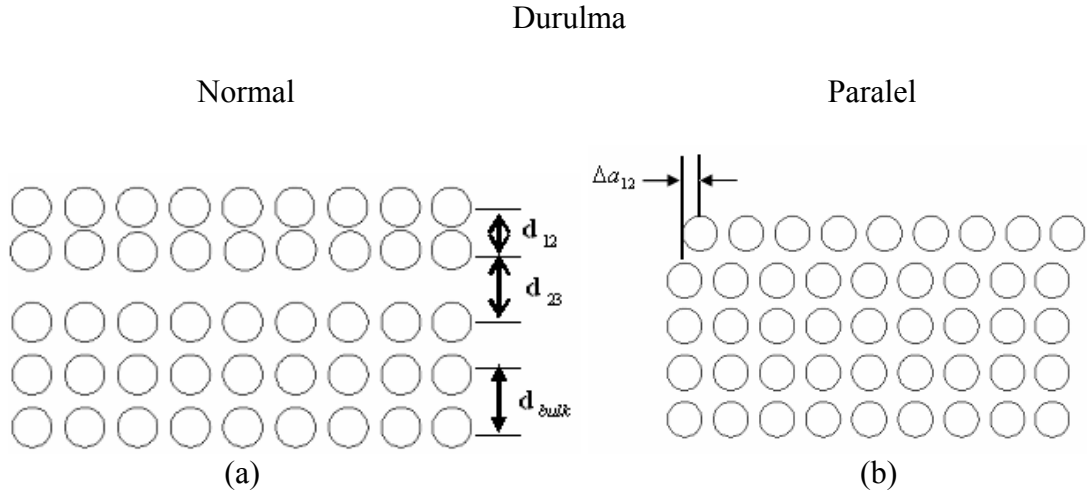
MBE tekniğiyle yapılan büyütme yüksek vakum ortamında gerçekleştiğinden yüksek enerjili elektron kırınım yansıması (RHEED), auger elektron spektroskopisi (AES), optik yansıma kırınımı gibi yüzey karakterizasyonları ile malzemenin büyümesi kontrol altına alınabilir. Böylece MBE büyütme tekniği ile yüksek kalitede yarıiletken kristaller üretilebilmektedir [30].

3.2. Temiz Yüzeylerin Atomik Yapısı

Yüzey biliminde yapılan birçok çalışma, alttaş (substrate) yüzeyinin temizlenmesi ile başlar. Bu nedenle temiz yüzeylerin atomik yapısını bilmek çok önemlidir. Böyle temiz bir yarıiletken yüzeyinin büyük kısmı, bulk içindeki atomik düzlemlerle benzerlik gösterir. Sonsuz bir kristali belirli bir kristal düzleminde kesildiğini varsayıp, oluşan yarı sonlu kristal yüzeyi ele alınırsa. Yüzeyin oluşması sırasında, komşu atomların yokluğu yani bağların kırılması meydana gelir. Böylece yüzey atomlarına etki eden kuvvetler ile yüzey atomlarının denge durumu bulk içindeki benzer atomik düzlemlerden farklı olur. Genel olarak iki tip atomik yeniden düzenlenme vardır. Bunlar durulma ve yeniden yapılanmadır.

Durulma; en üst katmandaki atomik yapının bulk içindeki katmanlarla aynı olduğu fakat birinci tabakalar arasındaki mesafenin değiştiği duruma normal durulma denir. Normal durulma bileşik olmayan metallerde görülür. Birçok durumda birinci tabakalar arası bölgenin küçülmesi ile sonuçlanır. Bulk içerisinde ise tabakalar arası mesafe farkı, derinlere inildikçe azalır. Normal durulmanın yanında diğer bir durulma biçimi de paralel ya da tanjantsal durulmadır. Paralel durulmada yüzeydeki atomik yapı, en üst tabakaların atomik yapısına göre paralel olarak düzenli bir

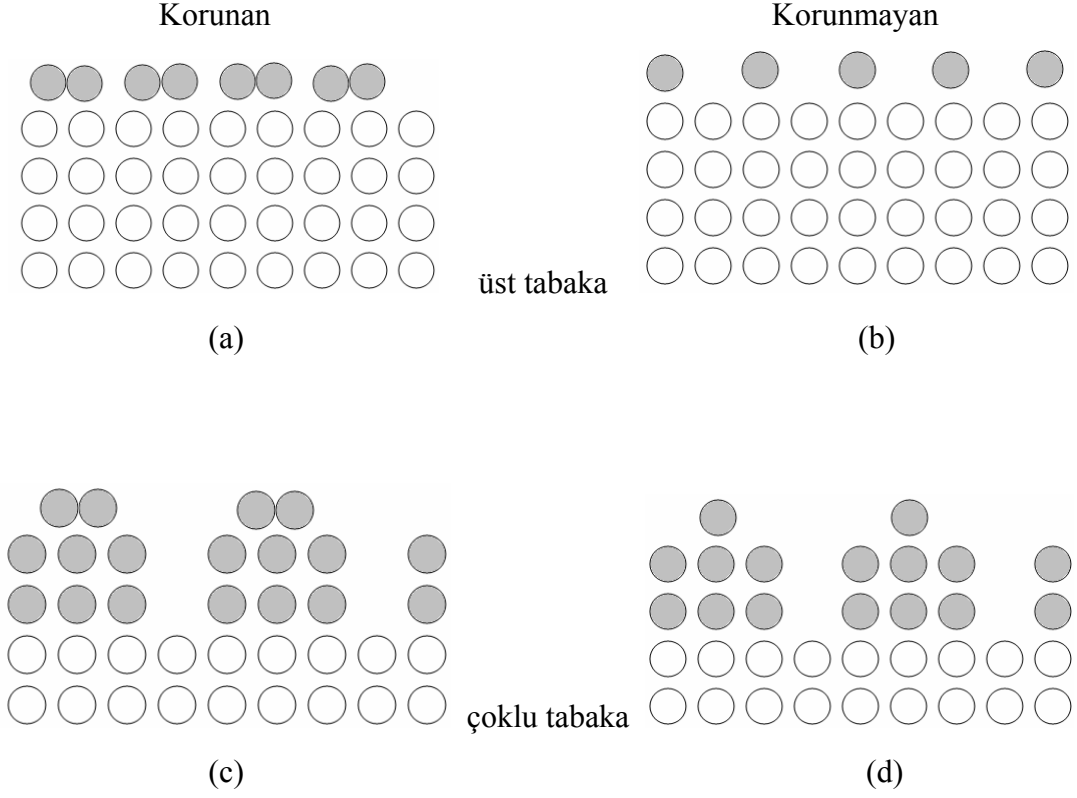
şekilde yeri değişir. Bu durum genellikle düşük atomik yoğunluğa sahip yüksek indisli yüzeylerde meydana gelir.



Şekil 3.3. Bir yarı sonsuz kristalin en üst atomik tabakalarının durulması a) normal durulma b) yanal durulma.

Yeniden Yapılanma; Üst tabakaların atomik yapılarının bulk durumundaki halinden farklı düzenlenmesine yeniden yapılanma denir. Bu farklı düzenlenme çoğunlukla simetrik ve periyodik olarak ortaya çıkar. Yeniden yapılanma, en üst tabakada ya da tabakalarda bulunan atomların sayısına bağlı olarak iki kısma ayrılabilir. Bu iki kısım korunan yeniden yapılanma ve korunamayan yeniden yapılanma olarak adlandırılabilir.

Yeniden Yapılanma



Şekil 3.4. Yeniden yapılanma türlerinin şematik gösterimi: (a) ve (c) koruna yeniden yapılanma. (b) ve (d) korunmayan yeniden yapılanma.

Korunan yeniden yapılanmada atomların sayısı korunur ve yeniden yapılanma sadece ideal yerlerden yüzey atomlarının yeniden konumlanmasını içerir. Bu yüzden korunan yeniden yapılanma, bazı kaynaklarda konumlanabilir yeniden yapılanma olarak da adlandırılır. Korunan yeniden yapılanmaya basit bir örnek, Şekil 3.4.a'da görüldüğü gibi çift periyodikliğe sahip bir yüzey örgüsündeki atom çiftleridir. Şekil 3.4.c'de ise korunan çok tabakalı yeniden yapılanmanın daha karmaşık bir örneği görülmektedir. Burada en üst üç tabakanın her birindeki atomların sayısı bulk içindeki atomik tabakalardan farklı olmasına rağmen, en üst üç tabakadaki toplam atom sayısı bulk içindekinin tamsayı katına eşit olmaktadır. Şekil 3.4.c'de verilen örnekte en üst üç tabakanın toplam atom sayısı, bulk içindeki bir tabakada bulunan atom sayısının 2 katıdır.

Korunmayan yeniden yapılanmada, yeniden yapılanmış olan tabakanın atom sayısı bulktaki tabakalara göre değişmektedir. Şekil 3.4.b'de verilen örnekte yeniden yapılanan atomlar bakımından eksik dizi görülmektedir. Şekil 3.4.d'de ise en üst üç tabakanın yeniden düzenlenmesini içeren korunmayan yeniden yapılanma gösterilmektedir. Burada yeniden yapılanan tabakalardaki toplam atom sayısı bulktaki tabakaların atom sayısının tam katına eşit değildir.

Yarıiletkenlerde kristalin ideal bulk bitiminde, doymamış bağların yüksek yüzey yoğunluğunun olması sonucunda kararsız durum meydana gelir. Serbest yüzey enerjisini minimize yapmak için doymamış bağların her biri diğeriyle yeni bağlar yapmaya çalışır. Bunun sonucunda ise yüzey atomlarının başlangıçtaki orijinal konumlarının yeri değişir. Yüzey enerjisinde daha fazla kazanç, kalan doymamış bağlar arasında elektrik yük aktarımı ile doymamış bağların bazıları boşaltılarak diğer doymamış bağlar ise doldurularak gerçekleştirilir. Bu mekanizma kendiliğinden yerini doldurma olarak tanımlanır. Atom konumları artan serbest yüzey enerjisi ile örgü gerilimine neden olur. Bu eğilimlerin karşılıklı etkileşimi belirli bir yeniden yapılanmanın oluşumuna götürür. Üst yüzey tabakalarında yeniden yapılanma genellikle daha derin tabakaların durulmasına eşlik etmiştir.

3.3. Atomik Olarak Temiz Yüzeylerin Hazırlanması

Yüzey analizi çalışmalarının yapıldığı birçok deneyde öncelikle gerekli olan Ultra High Vacuum (UHV (çok yüksek vakum)) şartlarının sağlanması gerekir. UHV odasına yerleştirilmeden önce numene çeşitli temizleme işlemlerinden geçirilir. Bu işlemler mekanik zımparalama, kimyasal yontma, organik çözeltiler içerisinde kaynatmak gibi temizleme işlemleridir. Bu işlemlerden sonra UHV odasında son temizleme işlemleri yapılır. Bunun için kullanılan en yaygın metotlar; kesmek, ısıtma, kimyasal süreç ve iyon saçmasıdır.

Kesme; Temiz yeni bir yüzey elde edebilmek için en uygun yöntemlerden biri UHV ortamında kesme işlemi yapmaktır. Kesme işlemi oksitler (ZnO , TiO_2 , SnO_2),

alkaliler (NaCl ve KCl), elementsel yarıiletkenler (Si ve Ge), ve bileşik yarıiletkenler (GaAs, InP, GaP) gibi bazı materyallere uygulanabilir. Tipik bir kesme yapısı; bir çubuk ve mekanik, manyetik ve elektriksel olarak odanın dışından kontrol edilen bir kamadan oluşur. Kesme işleminin bazı dezavantajları ise;

- I. Yalnızca kırılğan materyaller için uygundur.
- II. Kesilmiş yüzeyler tam düz değildir fakat onun yerine basamakların (steps) yüksek yoğunluğunu içermektedir. Zaten basamak yoğunluğu bölmeden bölmeye değişir, yüzey özelliklerini değişimi rastgele olabilir.
- III. Yalnızca belirli kristallografik doğrultularda kesmek mümkündür. Örneğin Si ve Ge için kesme düzlemi (111)' dir
- IV. Kesilmiş yüzeyler mutlak bir denge yapıya sahip değildir.

Isıtma; numune içinden elektrik akımı geçirmek, elektron bombardımanı, veya lazer tavlama gibi yöntemlerle bazı kristal yüzeyleri ısıtılır. Isıtma işleminde temel şart materyalin erime noktasının altındaki sıcaklıklarda yüzey oksitlerini buharlaştırmaktır. Bununla birlikte ısıtma işleminin düzgün yüzey elde etmede bazı eksiklikleri vardır. Tavlama numunenin bulk ve yüzeyinde kirliliklerin yayılmasına neden olabilir. Bazı kirlilikler örneğin yabancı atom olarak karbon çok güçlü bir şekilde bağlı olabilir, bu nedenle tamamen yabancı atomlardan kurtulmak çok zordur.

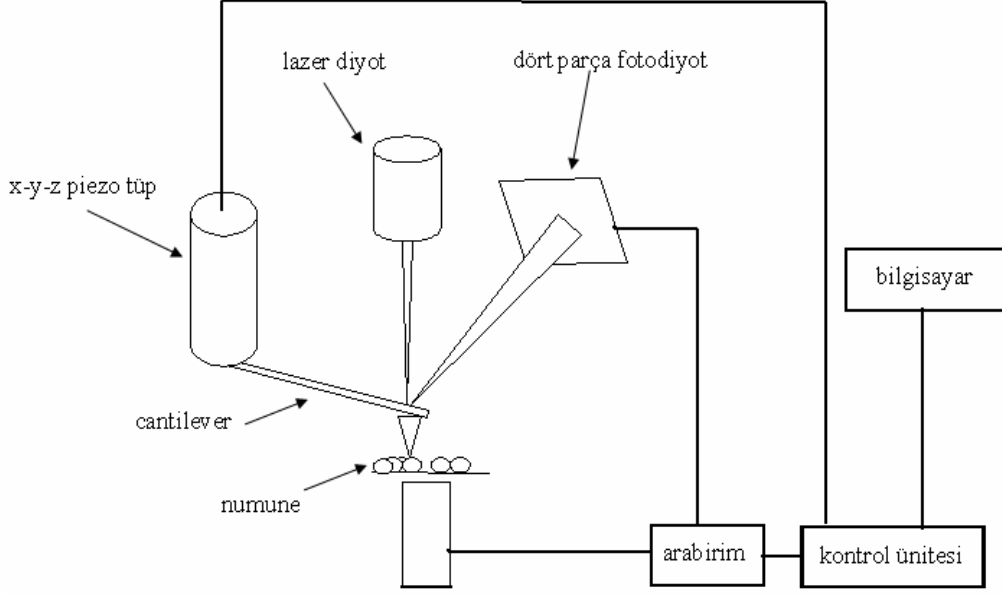
Kimyasal temizleme; termal temizlemeyi kolaylaştırmak için numune yüzeyine çeşitli kimyasal işlemler uygulanır. Kimyasal işlemler genellikle, 10^{-6} Torr veya daha düşük basınçta reaktif gazlar vakum odası içine alınır ve bu gaz ortamı içinde numune tavllanır. Bu gaz uçucu veya zayıf bağlı bileşiklerle reaksiyona girer. Örnek olarak C atomunun reaksiyon sonucu CO molekülüne dönüşmesi verilebilir. Böylece ısıtma işlemi ile yüzey üzerindeki kirlilikler yüzeyden daha kolay ayrılır.

İyon saçma ve tavlama; Ar^+ gibi soygaz iyonları ile yüzey bombardıman edilerek, yüzeydeki kirlilerden temizlenmesi işlemidir. İyonizerden üretilen iyonlar, istenilen

enerjiye sahip olacak şekilde hızlandırılarak örnek üzerine gönderilir. İyon saçma işlemi çok etkili bir yüzey temizleme yöntemidir. Ancak iyon bombardımanı sonucunda Ar atomları yüzeyde kalabilmektedir. Bu olumsuz durumdan kurtulmak için birkaç iyon saçma ve tavlama yapılır [31].

3.4. Atomik Kuvvet Mikroskobu (Atomic Force Microscopy: AFM)

Tarama tünelleme mikroskobu (scanning tunneling microscopy) çalışmalarında elde edilen başarılar, yeni taramalı uç mikroskobu metotlarının gelişmesine neden olmuştur. STM gibi tüm bu teknikler, oldukça iyi bir yaklaşımla atomik ve nanometrik ölçekte ölçülen yüzeyin özelliklerini haritalamak için numune yüzeyine göre araştırma ucunun uzaysal pozisyonunu kontrol edebilmeyi sağlayan pizoelektrik güç çeviricilerinin kullanımını temel alır. AFM bu metotlar arasında en yaygın uygulama alanına sahiptir ve hızla gelişmekte olan nanoteknoloji için vazgeçilmezdir. Elektronik, telekomünikasyon, biyoloji, kimya, otomotiv, uzay-havacılık ve enerji gibi endüstrilerde kullanılmaktadır. AFM, Binning, Quate ve Gerber tarafından 1986' da icat edildi. AFM yüzey topografisini angstrom mertebesinde 100 mikrona kadar ölçebilen bir tekniktir. Bu teknik, uç ile yüzey atomlarının arasındaki etkileşimleri temel alır. Şekil 3.5'de görüldüğü gibi numunenin yüzeyi, 'cantilever'ın sonuna yerleştirilmiş atomik sivrilikte bir uç ile taranır. Uçun yüzeyi taramasıyla atomlar arası kuvvetler nanonewton hassasiyetinde ölçülebilir [32, 33]. Uç ile numune arasındaki etkileşim 'cantilever'ın sapmasına neden olur. Genellikle bir fotodiyot yardımıyla sapmanın büyüklüğü ölçülür ve taranan alanın yüzey topografisi elde edilir.

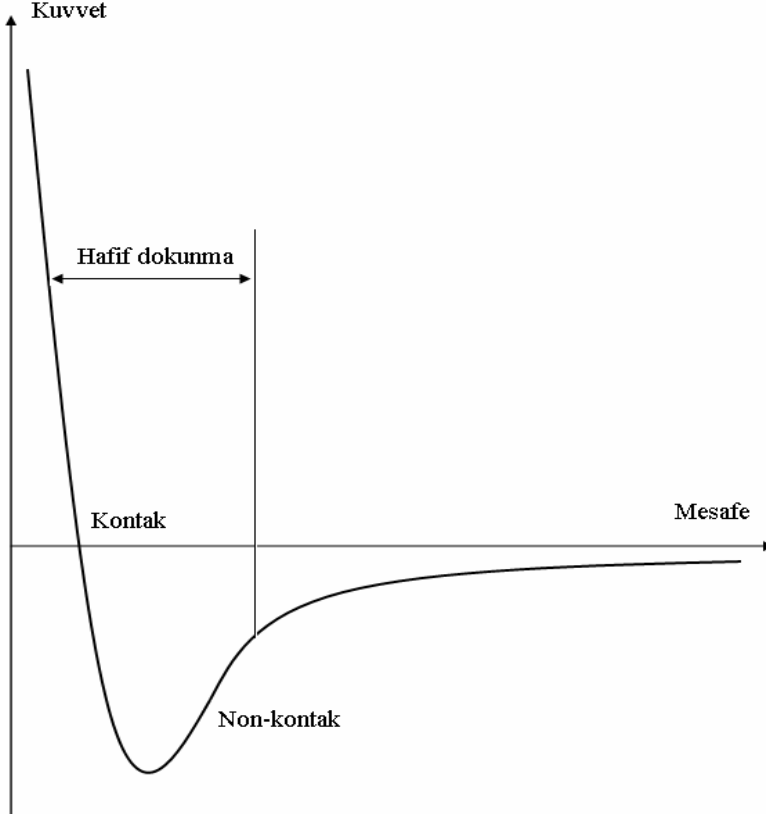


Şekil 3.5. AFM'in şematik gösterimi [34].

AFM tekniği sayesinde büyüme modu, numune yüzeyinin pürüzlülüğü, numune yüzeyindeki kusur tipleri ve kusur yoğunlukları ile ilgili bilgiler elde edilir. AFM tekniğinin STM tekniğine göre en önemli avantajı incelenen numunenin elektriksel iletken olması şartı yoktur. AFM tekniği İletken, yarıiletken ve yalıtkan malzemelerin yüzey çalışmasında kullanılabilir. AFM tekniğinin diğer bir üstünlüğü de vakumlama yapılmadan, hava ve sıvı içerisinde de çalışabilir. Bu nedenle yüzey pürüzlülüğünü belirlemede hızlı ve düşük maliyetli bir tekniktir. AFM tekniğinin önemli dezavantajları ise, görüntü boyutlarıyla (tarama alanı ve derinliği), görüntü kalitesinin ucun eğrilik yarıçapıyla sınırlı olması ve pizoelektrik malzemelerden etkilenmesidir [32, 33]. Burada bahsedilen pizoelektrik malzemeler; bir elektrik alanı altında sıkışan ya da genişleyen seramiklerdir. Bu hareketler bilgisayar ortamına veri olarak aktarılır. Böylece uç ile numune arasındaki etkileşimler ölçülür [35].

Şekil 3.6'da görüldüğü gibi tip ile örnek arasındaki etkileşim, atomlar arası mesafeye bağlıdır. Tip ile örnek uzaklaştığında, numune 'cantilever' ı daha zayıf bir şekilde çeker (eğrinin sağ tarafı). Uçun ve örneğin atomlarının elektron bulutlarının birbirini elektrostatik olarak itmeye başladığı mesafeye kadar tip ile örnek arasındaki

mesafenin azaltılması durumunda bu çekim kuvveti artar. Kimyasal bağ uzunluğuna yakın bir durumdaki mesafede net kuvvet sıfır olur.



Şekil 3.6. Uç ile örnek arasındaki van der Waals kuvvetinin atomlar arası mesafeye bağlılığı ve kontak mod, non kontak mod gösterimi.

AFM için çalışma modu, tip ile numune arasındaki mesafeye göre belirlenir. Bu çalışma modları; kontak mod, non-kontak mod ve tapping (hafif dokunma) modudur.

AFM kontak modunda uç ile örnek ayırımı mesafesi birkaç Å mertebesindedir. Bu durumda yüzey taranırken tip ile örnek hafif fiziksel kontak durumundadır ve itici kuvvetlere tabidir. İncelenen yüzeyin zarar görmemesi için cantileverin yaylanması sert olmamalıdır. Bu yüzden tip ile örnek arasındaki etkileşim, yüzey topografisine bağlı olarak cantileverin eğilmesine neden olur. Topografik AFM görüntüleri, ya sabit-yüksek mod ya da sabit-kuvvet moddan birinde elde edilir.

Sabit yükseklik modunda, tarama yüksekliği sabittir ve cantileverin sapması belirlenerek topografik görüntü oluşturulur. Sabit yükseklik modu atomik boyutta daha düz olan yüzeylerde (bu durumda cantileverin sapması az olur), ve hızlı tarama yapılması istenildiğinde tercih edilir. Böylece yüzeyin görüntüsü hızlı bir şekilde kayıt edilebilir.

Sabit kuvvet modunda, bir geribeslem mekanizması ile tarayıcı yüksekliği sürekli ayarlanarak etkileşim kuvveti sabit tutulur böylece cantileverin sapması değişmez. Görüntü tarayıcının hareketinden elde edilir. Sabit kuvvet modu, net kuvvetin iyi bir şekilde kontrol edilebilmesi ve tarama sonucunda elde edilen verilerin kolayca yorumlanabilmesinden dolayı en çok kullanılan moddur. Bu modun dezavantajı ise geribeslem devrinin cevaplama hızı sınırlı olduğu için tarama hızının da sınırlı olmasıdır.

AFM Non-Kontak modunda, tip ile örnek arasındaki mesafe yaklaşık birkaç on Å ile birkaç yüz Å arasındadır. Non-kontak modunda cantilever zayıf çekici kuvvetlerin etkisi altındadır. Bu teknik sert cantilever rezonans frekansı yakınında hareketli tutulur. Tipik frekans aralığı 100 ile 400 kHz arasındadır, tipik genliği de bir kaç on Å kadardır. Örnek ile uygun etkileşim için cantilever rezonans frekansı f_1

$$f_1 \propto \sqrt{c - F' / F'} \quad (3.1)$$

ifadesine göre değişir. Burada c cantilever yay sabiti ve F' kuvvetin gradienti (türevi)'dir. Eğer rezonans frekansı (titreşim genliği) tarayıcı yüksekliğini kontrol eden bir geribeslem sistemi ile sabit tutulursa, tarama ucu sabit gradient çizgilerini izler. Tarayıcı hareketi data seti oluşturmak için kullanılır. Bu mod, sabit gradient mod olarak da bilinir. AFM görüntülerinin elde edildiği non kontak modunda bulunan atomik düzenle bu modun ne kadar hızlı ve verimli olduğunu kanıtlanmıştır.

AFM tapping (hafif dokunma) modunda, non-kontak moda benzerdir. Tek farkı cantilever salınımının dip noktasında cantilever ucu örnek yüzeye ancak

dokunabilmektedir. Bu mod atomik çözümlmeyi elde edemez fakat yüksek topografiksel dalgalı pürüzlü yüzeylerin görüntüsü için yararlı olmaktadır [31]. AFM’de cantilever’in sapması çeşitli kuvvet ölçüm teknikleri ile bulunur. Bu teknikler; vakum tünelleme, mekaniksel rezonans, optiksel interferometri ve optiksel demet sapma gibi metotlardır [36].

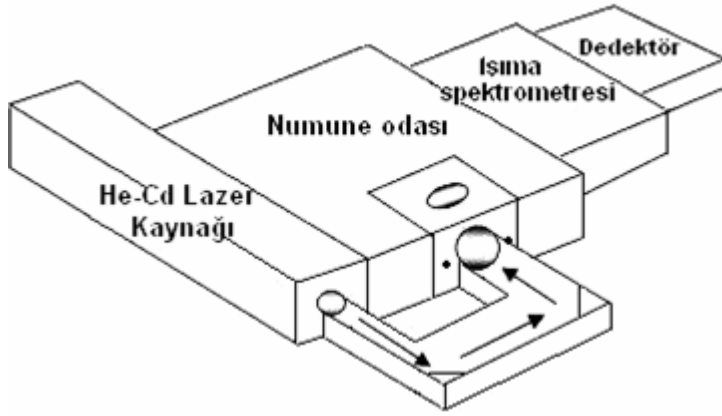
3.5. Fotolüminesans

Katırla ilgili yapılan değişik deneysel çalışmalar birçok bilimsel ilerlemeye neden olmuştur. Elektromanyetik radyasyonun kullanıldığı teknikler, bu deneysel çalışmaların içinde en faydalı olanlardandır. Katırların özelliklerde yarıiletkenlerin; kristal örgüleri, elektronik bant yapısı, kirlilik ve kusurların belirlenmesi gibi çalışmalar örnek olarak verilebilir. Fotolüminesans (PL), en çok kullanılan optiksel metotlardan biridir [37].

Yeterli enerjiye sahip ışık numune üzerine gönderildiğinde fotonlar soğrulur ve elektronik eksitonlar oluşur. Bu şekilde uyarılarak üst enerji seviyelerine çıkan elektronlar temel enerji seviyelerine dönerken ışıma meydana gelirse yayılan ışık fotolüminesans olarak bilinir. Bu ışık ile fotonla uyarılabilen (photoexcited) numuneler hakkında bilgi toplanabilir ve analiz edilebilir. Fotolüminesans (PL) spektrumu geçiş enerjilerini verir. Bu durum elektronik enerji seviyelerini ifade etmek için kullanılabilir. PL şiddeti, ışıklı ve ışımsız geçişlerin göreceli hızının bir ölçümüdür [33].

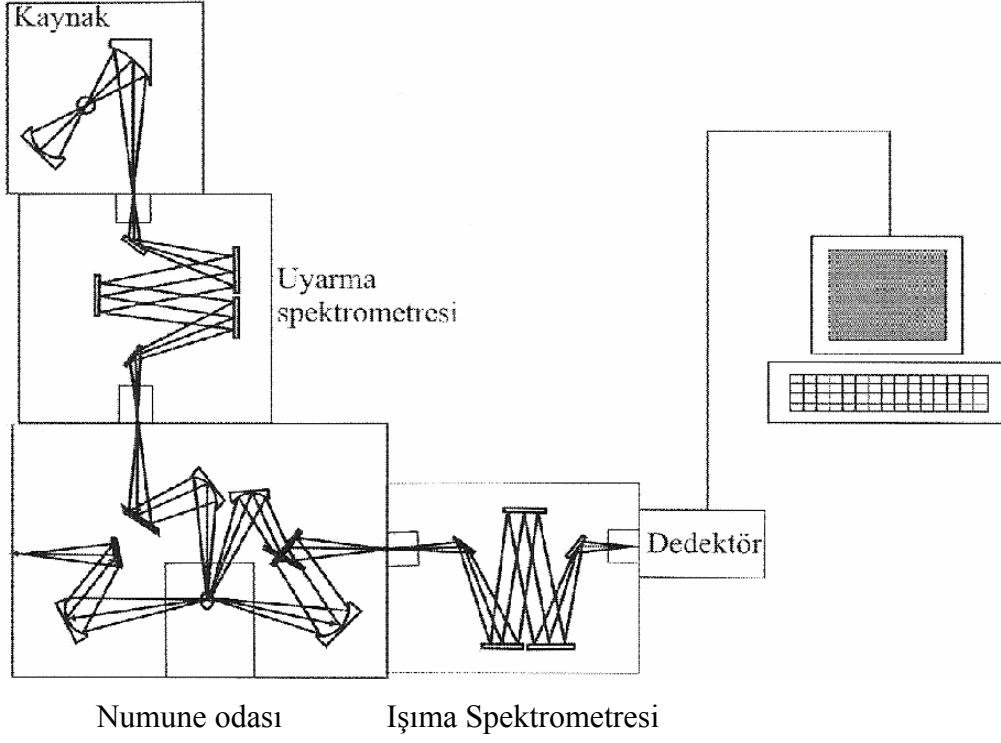
PL, bir numunenin soğurduğu veya yaydığı belli enerjiye sahip fotonlar sayesinde, numunenin elektronik durumları hakkında bilgi verir. Diğer bir önemli özelliği fotonlar tarafından uyarılan taşıyıcılar bantlar boyunca hızla termalize olur, böylece taşıyıcılar daha alt enerji seviyelerine yerleşerek PL ışınması, alt seviyeleri ayırmayı sağlar. Bu özellik sayesinde PL, kusur ve katkı seviyelerinin bulunduğu ara yüzeylerin analizini sağlar.

PL, numuneye zarar vermeyen çok yönlü optiksel bir sistemdir. PL, optiksel bir kaynak ve optiksel bir sayaç ya da spektrometreden oluşur. PL ölçümlerinde kullanılan deneysel düzenekler, ölçülmek istenen özelliklere ve kullanılan cihazlara bağlı olarak bazı değişiklikler gösterse de genel prensipler aynıdır. PL tekniğinin en temel prensibi; bir ışık kaynağı, bu ışık kaynağı ile uyarılan sistemin kendiliğinden yaydığı ışınımın toplanması ve enerji ya da dalga boyuna göre spektrumun elde edilmesidir. Bu tez çalışmasında kullanılan PL deneysel düzeneği Şekil 3.7’de kabaca gösterildi.



Şekil 3.7. Fotolüminesans ölçümlerinde kullanılan deneysel düzenek [35].

Fotolüminesans olayında uygun bir kaynak ile numune aydınlatılır, daha sonra numuneden çıkan ışık ışınım spektrometresi tarafından toplanarak dedektöre aktarılır. Dedektör bu optik sinyalleri elektrik sinyallerine çevirir, elektrik sinyalleri ise bilgisayar tarafından değerlendirilir [33].



Şekil 3.8. PL ölçümlerinde gerçekleşen fiziksel olayların şematik gösterimi

PL sinyalleri üç temel özellikle karakterize edilir. Bu temel özellikler; enerji, şiddet ve polarizasyondur. PL spektrumu, materyaldeki enerji seviyelerinde bulunan elektronlarla ilgili net ve eksiksiz bilgiler verir. PL pikleri, fotonla uyarılan elektronların yoğunluğuna bağlıdır. Uyarıcı ışığın şiddeti ayarlanarak çeşitli parametreler kontrol edilebilir. Numunenin türü ve kalitesi değiştiğinde, fotoluminesans pikleri ile uyarmanın konumu da değişir [38].

Fotoluminesans spektrumu ile numune ile ilgili; yasak bant aralığı, ara yüzey pürüzlülüğü, malzeme kalitesi, katkı ve safsızlık atomlarının türü gibi bilgiler elde edilebilir [33]. PL bir numunenin yüzeyinde meydana geldiği için yüzey karakterizasyonu çalışmalarında önemlidir. Bununla birlikte yüzey ve ara yüzeylerin yakınlarda elektronik durumları elde etmek içinde kullanılır. PL spektrumunun uyarma şiddetine olan bağımlılığı incelenerek, enerji dağılımı ve ara yüzey durumlarının yoğunluğu araştırılabilir.

PL ölçümleri, herhangi bir yüzeyde yapılabildiği için yüzey değişimleri nedeniyle meydana gelen olaylar incelenebilir. PL, numune odasındaki basınca duyarlı olmadığı için görece yüksek basınçta büyütülen yarıiletkenin yüzeyinin özelliklerinin incelenebilmesini mümkün kılar. PL, sıcaklığa ve yüksek spektral kararlılık için gerekli helyum sıcaklığına bağlı olmasına rağmen oda sıcaklığında da yapılan ölçümler birçok araştırma için yeterli olabilmektedir. Ayrıca PL incelenen yüzeyde oldukça küçük bir etkiye sahiptir ve düşük miktarda yapılan uyarma bir takım etkileri azaltabilir. Diğer optiksel karakterizasyon tekniklerine göre PL, numune kalınlığı yüzey düzgünlüğü ve ışın düzenlenmesi gibi konularda daha az sınırlayıcı şartlara sahiptir.

PL ölçümlerinde en önemli problem, ölçüm yapabilmek için incelenen numunenin ışık yayabilmesi gerekir. Dolaylı bant aralığına sahip yarıiletkenlerde, momentum uzayında iletim bant minimumu ile valans bant maksimumundan ayrılır. Bu yüzden dolaylı bant aralığına sahip yarıiletkenlerde PL verimliliği düşüktür. Işımsız geçişler, böyle numunelerde uyarılmış popülasyonların gevşemesine neden olur. Bu problem yüzey kalitesinin az olduğu numunelerde daha da artar. Yinede bir PL piki elde edilebilir. PL tekniği ile ara yüzey ve katkı seviyelerinin yoğunluğunun incelenmesi oldukça zor bir işlemdir. Burada bahsedilen seviyeler eğer ışımali mekanizmaların olduğu seviyeler ise, PL spektrumu yorumlanabilir ve bağdaştırılmış PL piklerinin boyutu, numunedeki katkı durumlarının görece ölçümünü sağlar [38].

Yarıiletken yüzeylerde etkili ve hızlı bir karakterizasyon tekniği olan PL optoelektronik ve mikroelektronik aygıtların geliştirilmesinde önemlidir. PL tekniği yüzey kusurlarına karşı çok iyi duyarlılığa sahiptir ve direk band aralıklı yarıiletken araştırmalarında geniş çapta kullanılır [39]. Özellikle 1984 den beri oda sıcaklığında alınan PL ölçümleri, bileşik yarıiletken materyallerinin kalitesini artırmak için yapılan hızlı ve yıkıcı olmayan karakterizasyon tekniği olmuştur [40].

4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada incelenen $Al_{0.47}Ga_{0.53}N$ SPD yapı Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezinde MOCVD (Metal organic chemical vopur deposition) tekniği ile safir alttaş üzerine (0001) yöneliminde büyütüldü. Ga, Al ve N kaynakları olarak Trimethylgallium (TMGa), trimethylaluminum (TMAI) ve ammonia kullanıldı. Tablo 1’de şematik olarak sunulan örnek, 0,01 μ m kalınlıklı AlN çekirdek katman, 0,2 μ m kalınlıklı AlN tampon katman, 0,012 μ m/0,01 μ m kalınlıklı AlGaN/ALN katman, 0,1 μ m kalınlıklı AlGaN katman, 0,35 μ m kalınlıklı n-AlGaN katman ve 0,1 μ m kalınlıklı AlGaN katmandan oluşmaktadır. Bu bölümde tavlama işleminin örneğin morfolojik ve optik özellikleri üzerindeki etkileri tartışılacaktır.

Örnek isopropyl alkol ($CH_3CH(OH)CH_3$) ile temizlenip tavlamadan önce AFM ve FL ölçümleri alındıktan sonra tavlama için vakum içine yerleştirildi. Yedek pompa çalıştırıldı. Basınç ölçer ve turbo açılarak ısı ölçer ayarlandı. 700, 800, 900 ve 950 °C sıcaklarda 240 sn tavlandı. Daha sonra soğutmak için ısı ölçer tekrar, her sıcaklık için 20 °C’ye ayarlanarak tavlama işlemi tamamlandı. Tavlama işlemlerinden sonra örneğin AFM ve FL ölçümleri yapıldı. AFM ölçümleri oda sıcaklığında ve atmosfer basıncında yapıldı. Fotoluminesans (FL) ölçümleri için 300 K sıcaklık ortamında 350 nm dalgaboyunda ışık üreten, 50 mW güç çıkışlı He-Cd lazeri kullanıldı. Numunenin ortam ışığından etkilenmesini engellemek için ölçümler karanlık ortamda yapılmıştır. İnce tabakaları (wafer) düşük dereceli ışık parlaklığı (photoluminescence) ile karakterize edilmiş olup fotoluminesans cihazı yardımıyla ölçüldü.

Çizelge 4.1. $Al_{0,47}Ga_{0,53}N$ Schottky fotodetektörün şematik yapısı

AlGaN	0,1 μm	t=25dak, TMAI=20/480/1000, TMGa=5/495/1000, T=1110C ⁰ , P=25mbar, NH3=650/50, P=25mbar
N-AlGaN	0,35 μm	t=35dak, TMAI=20/480/1000, SiH4=20/1800/950/25, TMGa=5/495/1000, T=1110C ⁰ , P=25mbar, NH3=650/50, P=25mbar
AlGaN	0,1 μm	t=10dak, TMAI=20/480/1000, TMGa=5/495/1000, T=1110C ⁰ , P=25mbar, NH3=650/50, P=25mbar
AlGaN/AlN *10	0,012 μm /0,01 μm	t=45s, TMAI=30/470/1000, TMGa=5/495/1000, T=1120C ⁰ , P=25mbar, NH3=650/50, P=25mbar t=1dak TMAI=30/470/1000, T=1120C ⁰ , NH3=650/50, P=25mbar
AlN tampon	0,2 μm	t=20dak, TMAI=30/470/1000, T=1135 C ⁰ , NH3=150/50, P=25mbar
AlN çekirdek	0,01 μm	t=2 dak, TMAI=15/485/1000, T=840 C ⁰ , NH3=200/50, P=50mbar
Safir alttaş		

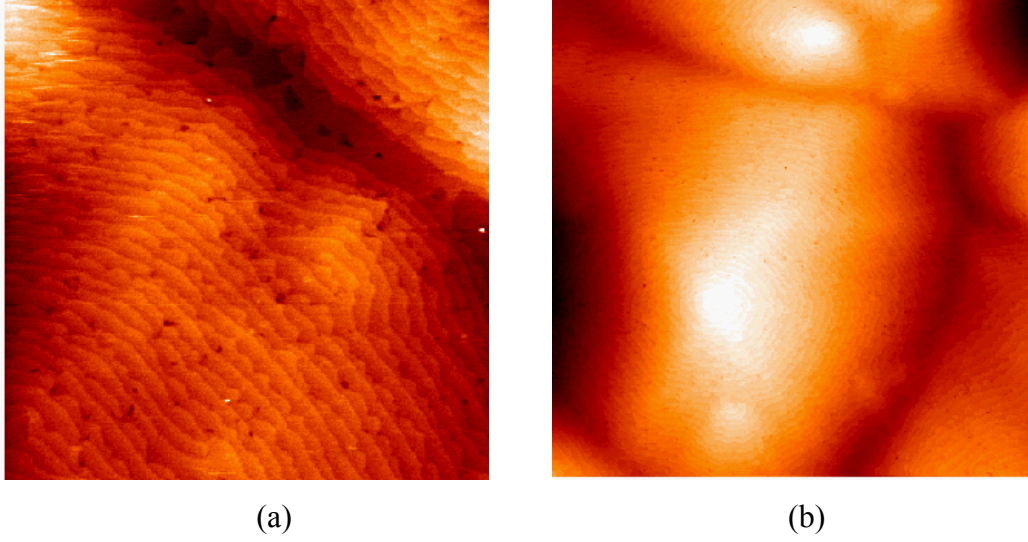
4.1. Yüzey Özellikleri

Bu çalışmada numune yüzeyi üzerinde 4 μm^2 ve 25 μm^2 tarama alanları için AFM ölçümleri alındı. Tavlama öncesi ve her bir tavlama işlemi sonrası AFM ölçümleri ile yüzeyin pürüzlülüğü incelendi. 4 μm^2 tarama alanı için yüzey kusurları daha net görülebilmektedir. 25 tarama alanı için ise numunenin yüzey pürüzlülüğünü değerlendirme açısından daha elverişlidir.

4.1.1. Numunenin tavlama işlemi öncesi yüzey özellikleri

Şekil 4.1.a ve b'de herhangi bir tavlama işlemi uygulanmadan önce oda sıcaklığında numunenin AlGaN yüzeyi üzerinden alınan 4 μm^2 ve 25 μm^2 tarama alanlı AFM görüntüleri verildi. Her iki görüntüde de AlGaN yüzeyi üzerinde basamaklar (steps)

ve teraslar gözlemlendi. Ayrıca $4 \mu\text{m}^2$ tarama alanlı AFM görüntüsünde (Şekil 4.1.a) numunenin yüzeyi üzerinde siyah noktalar ve çukurlar gözlemlendi.

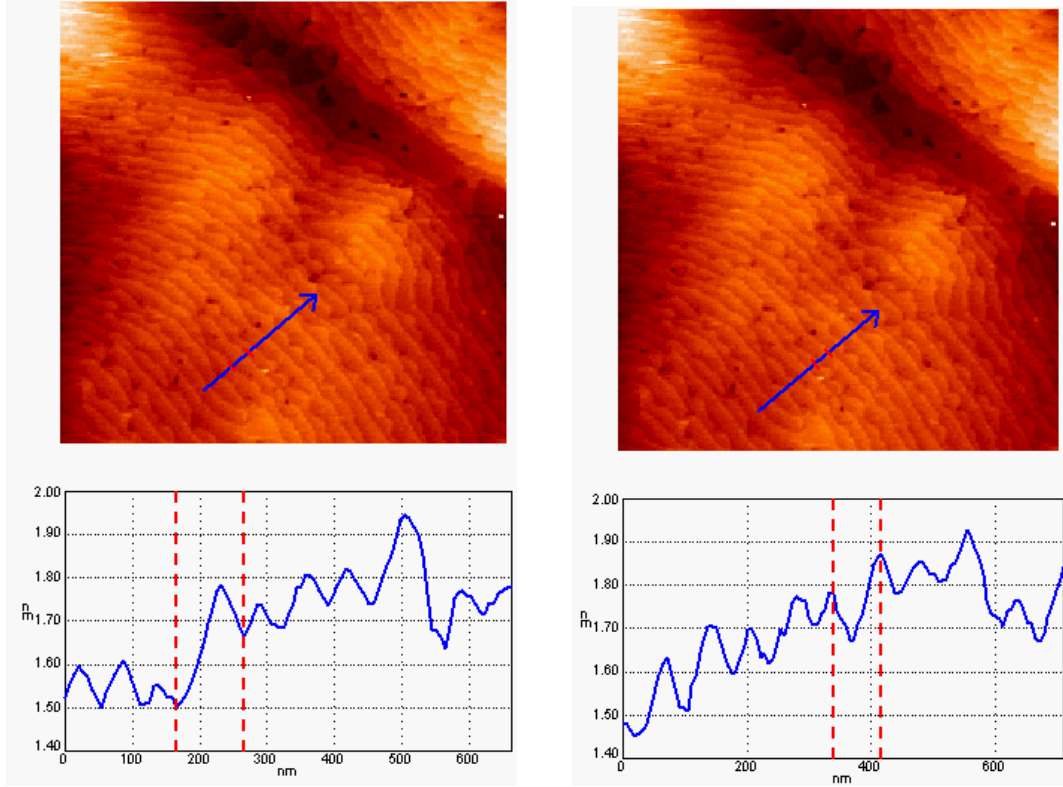


Şekil 4.1. Tavlama işlemi öncesi numunenin yüzeyi üzerinden alınan a) $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ b) $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ tarama alanlı AFM görüntüleri

AFM ölçümleri sonucu elde edilen RMS (Root Mean Square), yüzey pürüzlülüğünü değerlendirmede kullanılan en önemli parametrelerden biridir. Bununla birlikte AFM ölçümlerinde büyük tarama alanı üzerinden ölçülen RMS değeri numuneyi daha iyi temsil etmektedir. Bu yüzden AlGaN numunesinin yüzey pürüzlülüğü $25 \mu\text{m}^2$ tarama alanlı ölçümler dikkate alınarak değerlendirildi. Numunenin $4 \mu\text{m}^2$ ve $25 \mu\text{m}^2$ tarama alanı üzerindeki yüzey RMS pürüzlülüğü sırasıyla $0,38 \text{ nm}$ ve $1,78 \text{ nm}$ 'dir.

Yüzeylerde teras genişliği ve basamak yükseklik farkı yüzey pürüzlülüğünü değerlendirmede kullanılan parametrelerdendir. Yüzey üzerindeki dar teraslar yüzeyin pürüzlü, geniş teraslar ise yüzeyin pürüzsüz olduğunu gösterir. Torabi ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalarda AlGaN için teras genişliği 100 nm civarında olduğunda yüzeyin pürüzsüz olduğunu ifade ettiler [41]. Numunenin AlGaN yüzeyi üzerindeki teras genişliği şekil 4.2.a'da görüldüğü gibi 99 nm 'dir. Bu sonuç Torabi ve arkadaşları tarafından pürüzsüz AlGaN yüzeyler üzerinde ölçülen teras genişliği değerleri ile uyumludur. Ayrıca numunenin yüzeyi üzerindeki

basamak yükseklik farkı 0.24 nm'dir (Şekil 4.2.b). RMS değerleri ve teras genişliğinin yanı sıra basamak yükseklik farkı da numunenin pürüzsüz bir yüzeye sahip olduğunu göstermektedir.

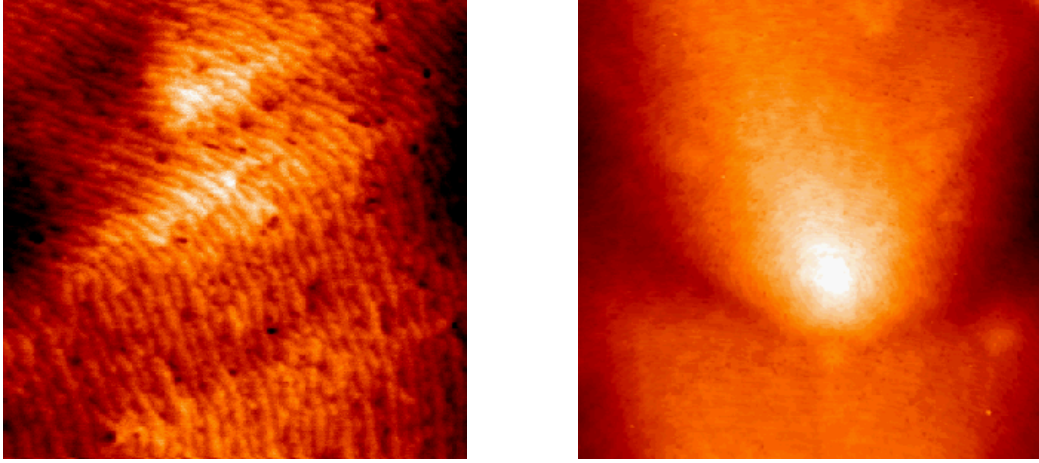


Şekil 4.2. Tavlama işlemi öncesi numune yüzeyi üzerindeki a) teras genişliği 99 nm, b) step yükseklik farkı 0.24 nm

4.1.2. Numunenin 700 °C'ye tavlama sonrası yüzey özellikleri

Şekil 4.3.a ve b'de 700 °C tavlama işleminden sonra numunenin AlGaIn yüzeyi üzerinden alınan $4 \mu\text{m}^2$ ve $25 \mu\text{m}^2$ tarama alanlı AFM görüntüleri sunuldu. Tavlama öncesi AFM görüntüsündekine benzer şekilde yüzey üzerinde basamak türü morfoloji gözlemlendi. Yüzey pürüzlülük (rms) değerleri $4 \mu\text{m}^2$ ve $25 \mu\text{m}^2$ tarama alanlı görüntüler için sırasıyla 0.24 nm ve 1.60 nm olarak ölçüldü. $25 \mu\text{m}^2$ tarama alanlı AFM görüntüleri dikkate alındığında pürüzlülüğün belirgin bir biçimde düştüğü

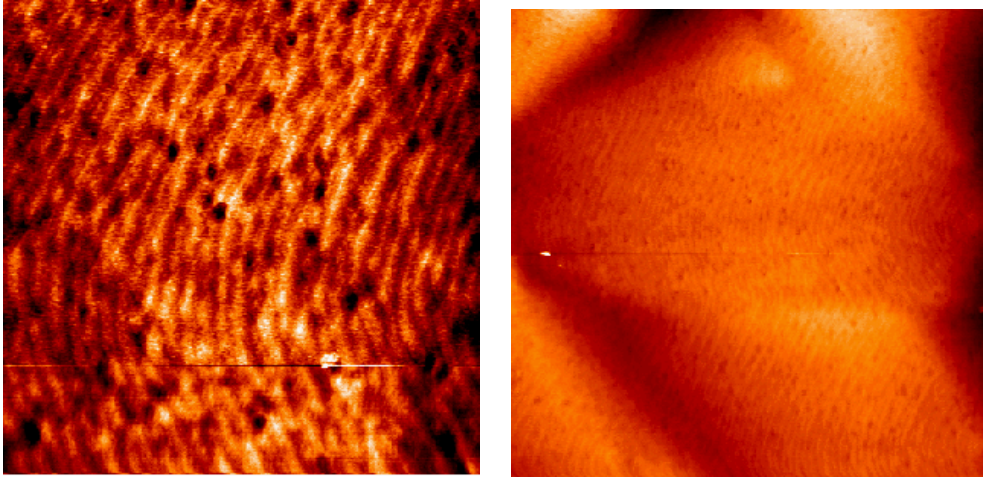
görüldü. Bunun nedeni tavlama işleminin numune yüzeyindeki kirlilikleri kaldırmasıdır [31].



Şekil 4.3. Numunenin 700 °C'ye tavlama işleminden sonraki a) 2x2 μm^2 b) 5x5 μm^2 tarama alanlı AFM görüntüleri

4.1.3. Numunenin 800 °C'ye tavlama sonrası yüzey özellikleri

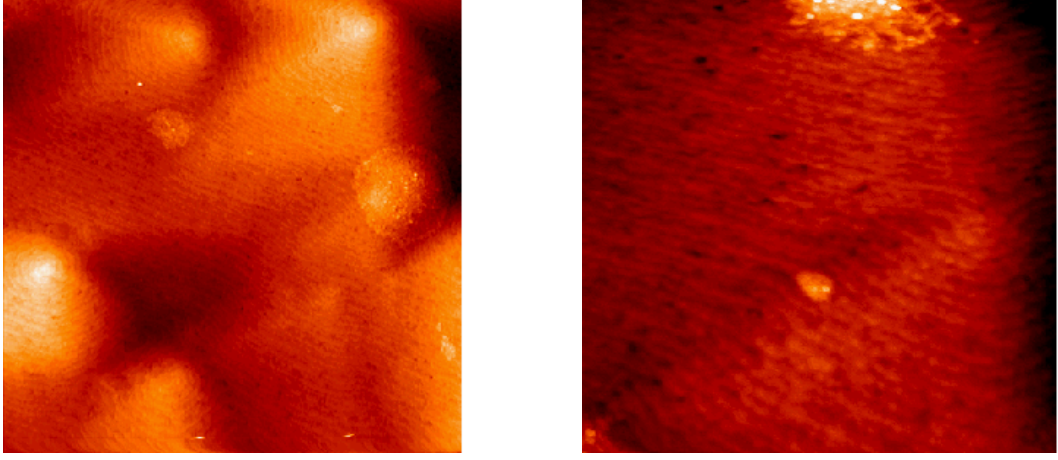
Şekil 4.4.a ve b'de 800 °C tavlama işleminden sonra numunenin AlGaIn yüzeyi üzerinden alınan 4 μm^2 ve 25 μm^2 tarama alanlı AFM görüntüleri sunulmuştur. AFM görüntüsünden de anlaşılacağı üzere tavlama öncesi ve 700 °C tavlama sonrasına benzer şekilde yüzey üzerindeki basamak türü morfolojinin değişmediği gözlemlendi. Yüzey pürüzlülük (rms) değerleri 4 ve 25 μm^2 tarama alanlı görüntüler için sırasıyla 0.11 nm ve 0.64 nm'dir. 800 °C tavlama işleminden sonra da yüzey pürüzlülüğündeki düşüşün devam ettiği görüldü.



Şekil 4.4. Numunenin 800 °C'ye tavlama işleminden sonraki a) 2x2 μm^2 b) 5x5 μm^2 tarama alanlı AFM görüntüleri

4.1.4. Numunenin 900 °C'ye tavlama sonrası yüzey özellikleri

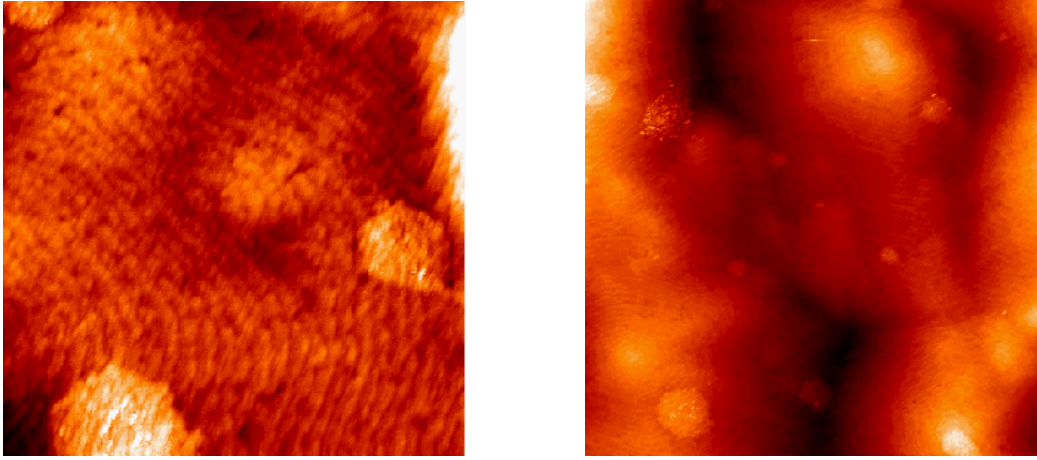
Şekil 4.5.a ve b'de 900 °C tavlama işleminden sonra numunenin AlGaIn yüzeyi üzerinden alınan 4 μm^2 ve 25 μm^2 tarama alanlı AFM görüntüleri sunulmuştur. Tavlama öncesi, 700 ve 800 °C'ye tavlama benzer şekilde yüzey üzerinde basamaklı ve teraslı yapı gözlemlendi. Bununla birlikte yüzey pürüzlülük (rms) değerleri 4 μm^2 ve 25 μm^2 tarama alanlı görüntüler için sırasıyla 0.40 nm ve 0.85 nm'dir. Daha önceki tavlama işlemlerinden farklı olarak 900 °C'ye tavlama işleminden sonra yüzey pürüzlülüğünde artış görüldü. Bunun nedeni tavlama işleminden sonra numune yüzeyindeki termal bozukluktur (tümsekler) [31].



Şekil 4.5. Numunenin 900 °C'ye tavlama işleminden sonraki a) 2x2 μm^2 b) 5x5 μm^2 tarama alanlı AFM görüntüleri

4.1.5. Numunenin 950 °C'ye tavlama sonrası yüzey özellikleri

Şekil 4.6.a ve b'de 950 °C'ye tavlama işleminden sonra numunenin AlGaIn yüzeyi üzerinden alınan 4 μm^2 ve 25 μm^2 tarama alanlı AFM görüntüleri sunulmuştur. Tavlama öncesi ve daha önceki tavlama işlemleri (700, 800, 900 °C) sonrasında olduğu gibi yüzey üzerinde basamaklı ve teraslı yapı gözlemlendi. Bununla birlikte yüzey pürüzlülük (rms) değerleri 4 μm^2 ve 25 μm^2 tarama alanlı görüntüler için sırasıyla 0.28 nm ve 1.30 nm'dir. Bir önceki 900 °C tavlama işlemine göre 950 °C tavlama işleminden sonra yüzey pürüzlülüğünde artma görüldü. Yüzey pürüzlülüğündeki artışın nedeni tümsek yoğunluğunun artmasıdır.



Şekil 4.6. Numunenin 950 °C'ye tavlama işleminden sonraki a) 2x2 μm^2 b) 5x5 μm^2 tarama alanlı AFM görüntüleri

AFM ölçümleri sonucu tavlama işlemleri sonrası (700, 800, 900, 950 °C) numunenin yüzey üzerindeki basamaklı ve teraslı yapının korunduğu görüldü. Numunenin 700 ve 800 °C'ye kadar yapılan tavlama işlemi sonrası yüzey pürüzlülüğü azaldı. Numune 900 °C'de tavlandıktan sonra yüzey üzerinde basamaklı ve teraslı yapının yanı sıra termal bozulmalar (çeşitli büyüklükte tümsekler) görüldü. Son olarak numune 950 °C'ye tavlandığında yüzey üzerinde termal bozulmaların yoğunluğunun arttığı gözlemlendi. Bu bozulmalar neticesinde RMS değerleri artmıştır. Yapılan tavlama işlemleri içinde en uygun tavlama sıcaklığının 800 °C olduğu görüldü.

Çizelge 4.2 Tavlama sıcaklığına karşı RMS değerleri

Tavlama Sıcaklığı (°C)	RMS (nm) 5x5 μm^2 Tarama Alanı
Tavlama öncesi (RT)	1,78
700	1,60
800	0,64
900	0,85
950	1,30

AFM ölçümleri sonucu, RMS değerleri göz önünde bulundurulduğunda, tavlama işleminin yüzey pürüzlülüğünü azalttığı, fakat belli bir tavlama sıcaklığının üzerinde yüzey üzerinde bozulmaların meydana geldiği ve yüzey pürüzlülüğünün giderek arttığı görülmüştür.

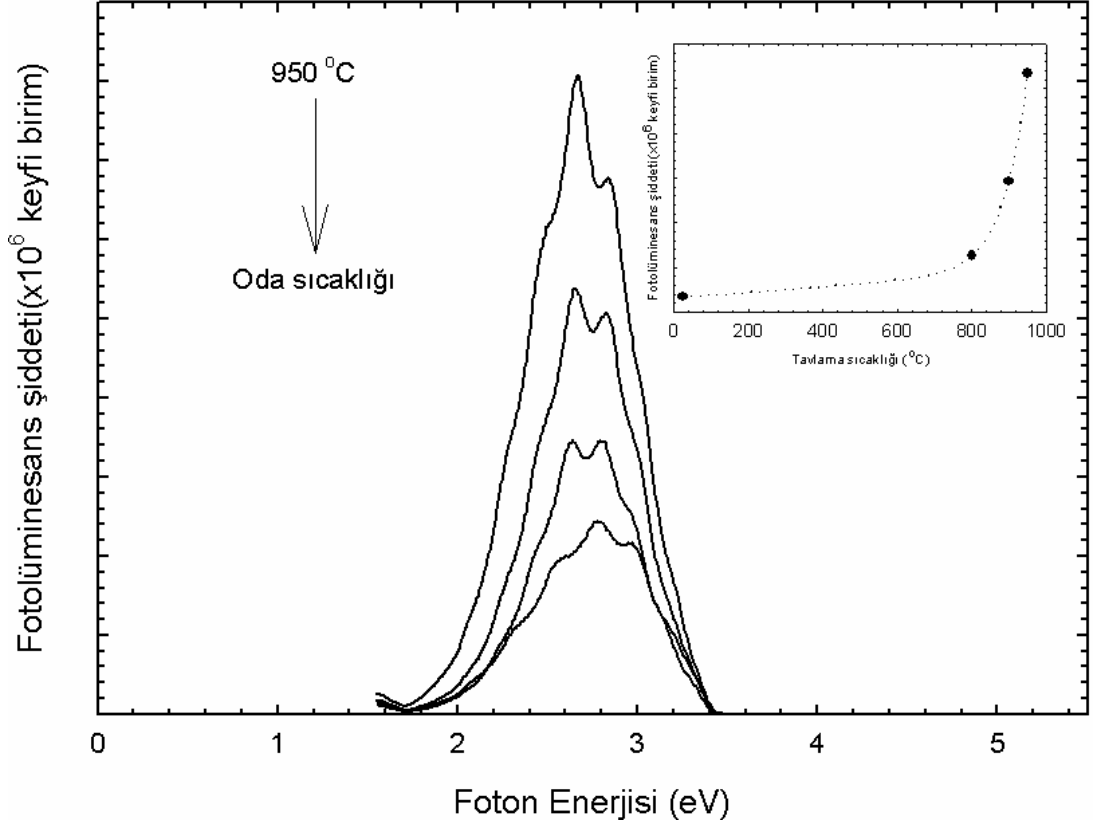
4.2. Optik Özellikler

AlGaN numunesinin tavlandıktan önce ve her bir tavlama işleminden sonra oda sıcaklığında PL ölçümleri alındı.

4.2.1. Fotoluminesans ölçümleri

AlGaN numunesinin PL şiddetinin foton enerjisine bağlı grafiği şekil 4.7’de görülmektedir. Tavlandıktan önceki PL grafiğinde pike karşılık gelen foton enerjisi 2,805 eV olarak ölçülmüştür. Tavlama işlemlerinden sonra yapılan ölçümlerde PL piklerinde yarımalar belirginleşmiştir. Son tavlama sıcaklığı olan 950 °C’de bu piklere karşılık gelen foton enerjileri sırasıyla 2,683 eV ve 2,857 eV olarak ölçülmüştür. Bu yarımalar, kusurlardan kaynaklanabilir. Şekil 4.7’de görüldüğü gibi en yüksek PL şiddeti 950 °C’ye tavlandıktan sonra elde edilmiştir. En düşük PL şiddeti ise tavlandıktan önce ölçülmüştür.

$Al_xGa_{1-x}N$ alaşımları, 3.4eV (GaN) ile 6.2eV (AlN) arasında değişen direk geniş bant aralığına sahiptir [12]. Yapılan PL ölçümünde piklere karşılık gelen foton enerjileri 2,643 eV ile 2,857 eV arasında olduğundan PL spektrumunda banttan-banda geçişlere ilişkin bir ışımaya gözlenememiştir. PL ölçümünde görülen ışımalar numunedeki kusurlardan kaynaklanmaktadır. Oluşan pikler ise safsızlık seviyelerinden dolayı oluşan piklerdir [7].



Şekil 4.7 Tavlama sıcaklığına göre PL grafiği

Şekil 4.7’de görüldüğü gibi tavlama sıcaklığı arttıkça PL piklerinin şiddeti artmaktadır. En yüksek pik 950 °C’ye tavlandıktan sonra elde edilmiştir. AFM ölçümlerinde ise yüzey pürüzlülük değerinin en az olduğu tavlama sıcaklığı ise 800 °C’de ölçülmüştü. PL ile AFM arasındaki bu fark PL ölçümünün aynı zamanda ara yüzeylerden de ölçüm alabilmesi ve tavlama sıcaklığı arttıkça ara yüzeylerde meydana gelen düzelmelerden kaynaklanıyor olabilir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada incelenen $Al_{0.47}Ga_{0.53}N$ SPD yapı Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji MOCVD tekniği ile safir alttaş üzerine (0001) yöneliminde büyütülen $Al_{0.47}Ga_{0.53}N$ numunesinin morfolojik ve optik özellikleri incelendi.

AFM ölçümleri ile tavlama işleminden önce AlGaN numunesinin yüzeyinin basamaklı ve teraslı bir yapıya sahip olduğu gözlemlendi. 700, 800, 900, 950 °C'de tavlama işlemleri sonrasında da numunenin yüzeyi üzerindeki basamaklı ve teraslı yapının korunduğu görülmüştür. Tavlama işlemi öncesi numune yüzeyinin 25 μm^2 tarama alanı için RMS değeri 1,78 nm olarak ölçüldü. Bu değer numunenin oldukça düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğunu göstermiştir. Numunenin 700 °C'ye tavlandıktan sonra 25 μm^2 tarama alanı için RMS değeri 1,60 nm olarak ölçüldü. RMS değerinin küçülmesi yüzey pürüzlülüğünün azaldığını gösterdi. 800 °C'ye tavlama işlemi sonrası yüzey pürüzlülüğündeki azalmanın devam ettiği görüldü. Numune 900 °C'ye tavlandıktan sonra yüzey üzerinde basamaklı ve teraslı yapının korunmasının yanı sıra termal bozulmalar (çeşitli büyüklükte tümsekler) görülmüştür. Numune 950 °C'ye tavlandığında yüzey üzerinde termal bozulmaların yoğunluğunun arttığı gözlemlenmiştir. Bu bozulmalar neticesinde RMS değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan tavlama işlemleri içinde RMS değerinin en küçük olduğu tavlama sıcaklığının 800 °C olduğu ve bu sıcaklıkta numune yüzeyinin daha pürüzsüz olduğu görüldü. Tez çalışmasında elde edilen sonuçlar uygun tavlama sıcaklığının numunenin kalitesini artırdığını ortaya koydu.

AlGaN numunesinin tavlandıktan önce ve tavlama işlemleri sonrasında oda sıcaklığında PL ölçümleri yapıldı. Alınan PL ölçümlerinde en küçük PL şiddeti tavlandıktan önce, en yüksek PL şiddeti ise 950 °C'ye tavlandıktan sonra alınan PL ölçümünde elde edildi. PL ölçümleri sonucunda AlGaN çoklu yapının yüzey ve ara yüzeyleri birlikte ele alındığında malzeme kalitesinin tavlama sıcaklığı arttıkça arttığı gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Sze, S.M., "Semiconductor Devices Physics and Technology", *Murray Hill*, New Jersey, 1-11 (1985).
2. Türkoğlu, A., "GaAs-Al_xGa_{1-x}As heteroyapı ve çoklu kuantum kuyu IR fotodetektörün elektro-optik özelliklerinin incelenmesi", Doktora Tezi, *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sivas, 4-5 (2007).
3. Acar, S., "GaAs ve InP yarıiletkenlerde elektriksel karakterizasyon", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1 (2003).
4. Kittel, C., "Katıhal Fizikine Giriş", Bekir Karaoğlu, **Güven**, İstanbul, 139 (1996).
5. 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).
6. Kang, J., Tsunekawa, S., Kasuya, A., "Dislocations around precipitates in AlGaN epilayers", *J. Mater. Res.*, 47: 2007-2010 (2002).
7. Yıldırım, B., "Al_{0.52}Ga_{0.48}N Schottky fotodetektör yapının optiksel ve yüzeysel özellikleri", Yüksek lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-2 (2007).
8. Duke, C.B., "Surface science: the first thirty years", *Surf. Sci.*, Amsterdam, 299-300 (1994).
9. Razeghi, M., Henini, M., "Optoelectronic devices III-nitrides 1st ed.", *Elsevier*, London, 23 (2004).
10. 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).
11. Tut, T., "GaN/AlGaN-based UV photodetectors with performances exceeding the PMTS", Doktora Tezi, *Bilkent Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-3 (2008).
12. Hongbo, Y., Ülker, Özbay, E., "MOCVD growth and electrical studies of p-type AlGaN with Al fraction 0.35" *Science Direct*, 289: 419-422 (2006).

13. Cao, X. A., Syed, A. A., Piao, H., "Investigation of the electronic properties of nitrogen vacancies in AlGaN", *Journal of Applied Physics*, 105: 063707 (2009).
14. Smith, S.D., "Optoelectronic devices 1st ed.", *Prentice Hall*, London, 1-3 (1995).
15. Wilson, J., Havkes, J. F. B., "Optoelektronik", Çeviri: Dr. İbrahim Okur, *Değişim yayınları*, Adapazarı, 282-325 (2000).
16. Kartal, D., "Kuantum kuyulu kızılötesi fotodetektörler (QWIP)", Yüksek Lisans Tezi, *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sivas, 5-7 (2006).
17. Anderson, B. L., Anderson R. L., "Fundamentals of semiconductor devices" *Mc Graw Hill*, New York, 675-676 (2005).
18. Bhattacharya, P., "Semiconductor optoelectronic devices 2nd ed.", *Department of Electrical Engineering and Computer Science Uni. of Michigan*, United States of Amerika, 345 (1997).
19. Musayev, E., "Optoelektronik devreler ve sistemler", *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 77-80, 86-111 (1999).
20. Bodur, A., Gerçek, C., Dinçer, G., "Uygulamalı elektronik devreler-9 optoelektronik devre uygulamaları" *MİNPA Matbaacılık ve Ticaret Limited Şirketi*, Ankara, 9-11 (2000).
21. Özdemir, A.F., "Metal/n-tipi GaAs Schottky diyotlarında havada oksitlenme yaşlanmanın akım-gerilim (I-V) ve kapasite, konduktans-gerilim, frekans (C,G-V, f) karakteristiklerine etkisi", Doktora Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 9-11 (2002).
22. Bıyıklı, N., "Design, fabrication and characterization of high performance resonant cavity enhanced photodetectors", Doktora Tezi, *Bilkent Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, 5-6 (1998).
23. Clifford, R.P., "Fundamentals of optoelectronics", *Irwin.*, the United States of America, 362(1995).
24. Bhattacharya, P., "Semiconductor optoelectronic devices", *Prentice-Hall, Inc.*, the United States of America, 37-42 (1994).
25. Bütün, S., "The growth, fabrication, and characterization of high performance AlGaIn metal-semiconductor-metal photodiodes", Yüksek Lisans Tezi, *Bilkent Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, 14 (2006).

26. Çörekçi S., “Grup III-IV bileşik yarıiletkenlerde AFM yüzey karakterizasyonu”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 34-36 (2008).
27. Brown, G.J., Razeghi, M., “Photodetectors: materials and devices IV”, **The Internatiol Society for Optical Engineering**, the United States of America, 2002 (1999).
28. Abell, J., “Kinetics of growth of indium gallium nitride alloys by MBE and development of polar and non-polar indium gallium nitride MQWs”, Doktora Tezi, **Boston University**, California, 25 (2008).
29. Xue, W., “MBE growth and characteristics of antimonide-based quantum dots”, Doktora Tezi, **University of Houston**, Texas, 19-21 (2006).
30. Gümüş, H., “Al_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs (100) nano yapısını büyütülmesi ve IV özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 32 (2005).
31. Oura, K., Lifshits, V. G., Saranin, A. A., Zotov, A. V., Katayama, M., “Surface science”, **Springer**, Berlin, 35-38, 171-173, 164-168 (2003).
32. Usanmaz D., “STM/AFM ile yüzeysel karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 34-39 (2005).
33. Çörekçi S., “Grup III-IV bileşik yarıiletkenlerde AFM yüzey karakterizasyonu”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 34-36 (2008).
34. Bhushan, B., Kavata, S., “Applied scanning probe methods VI characterization”, **Springer**, Berlin, 104 (2007).
35. Tecimer, H., “Al_{0.43}Ga_{0.57}N süperörgülerinin yapısal ve optik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 31(2007).
36. Karaköse, M., “Consruction of an atomik force microscope operating in air and liquid”, **Bilkent Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 10 (2003).
37. Perkowitz, S., “Optical characterization of semiconductors: infrared, raman, and photoluminescence spectroscopy”, **Akademic Press Limited**, London, 1-61 (1993).
38. Özkaya S., “GaAs/Al_{0.2}Ga_{0.8}As süperörgünün optiksel özelliklerinin fotoluminesans yöntemiyle incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1-21 (2005).

39. Timoshenko V.Yu., Rappich J., Dittrich T., “Express characterization of indirect semiconductor surfaces by in situ photoluminescence during chemical and electrochemical treatments”, *Applied Surface Science*, 123/124 (1):111– 114, (1998).
40. Benbakhti, T., Mehal, D., Krawczyk, S. K., Basson, G., “Effect of lateral diffusion on the photoluminescence intensity of semiconductor compounds: study of theoretical three-dimensional photoluminescence”, *Microelectronics Journal*, 30 (7): 643-649 (1999).
41. Torabi,A., Ericson, P., Yarranton, 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 : ŞEFTALİCİ, Mehmet
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 30.06.1977 Malatya
Medeni hali : Evli
Telefon : 05058326781
E-mail : mseftalici@yahoo.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi /Fizik	2002
Lise	Gazi Lisesi	1995

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Masa tenisi, Bilgisayar Teknolojileri