

# GaN

Teknolojisi ve Malzeme  
Üretimi

**Dr. Mehtap DEMİR**

**ISBN: 978-625-6181-56-4**

**Ankara - 2024**

# **GaN TEKNOLOJİSİ VE MALZEME ÜRETİMİ**

**MEHTAP DEMİR<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Adıyaman Üniversitesi  
ORCID ID: 0000-0001-6568-6080  
mehtapdemir@adiyaman.edu.tr

DOI: 10.5281/zenodo.14163327

ISBN: 978-625-6181-56-4



Copyright © 2024 by UBAK publishing house  
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, distributed or  
transmitted in any form or by  
any means, including photocopying, recording or other electronic or mechanical  
methods, without the prior written permission of the publisher, except in the case of  
brief quotations embodied in critical reviews and certain other noncommercial uses  
permitted by copyright law. UBAK International Academy of Sciences Association  
Publishing House®  
(The Licence Number of Publicator: 2018/42945)

E mail: [ubakyayinevi@gmail.com](mailto:ubakyayinevi@gmail.com)

[www.ubakyayinevi.org](http://www.ubakyayinevi.org)

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.  
UBAK Publishing House – 2024©

**ISBN: 978-625-6181-56-4**

November / 2024

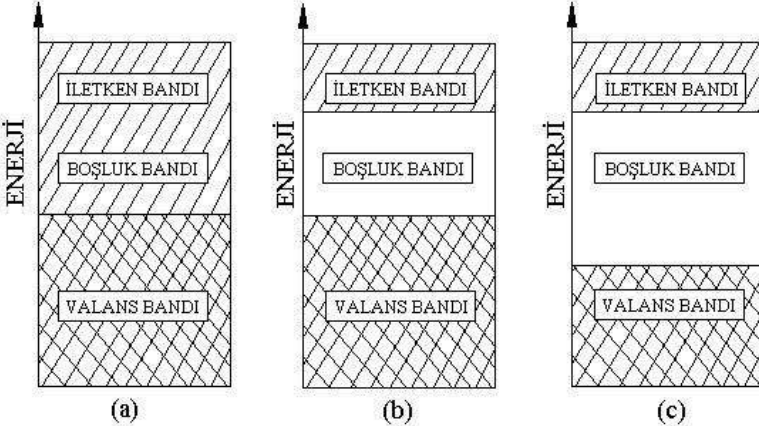
Ankara / Turkey

## GİRİŞ

Galyum, bir yarıiletkenidir. Yarıiletken, belirli elektriksel özellikler gösteren kristal veya amorf katıdır [1]. Normal şartlar altında, bir yarıiletken elektriği iletmez, yalıtkandır. Ancak herhangi bir mekanik etki ile (ısı, ışık, magnetik etki veya elektriksel gerilim) iletken duruma geçebilirler. Uygulanan bu dış etki veya etkiler ortadan kaldırıldığında tekrar eski hallerine dönüp yalıtkan hale geçerler. Bu özellikleri sebebiyle, elektronik alanında yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Yarıiletkenlerin valans bandında (son yörüngeleri), dört elektron bulunur. Dirençleri; iletkenlerin direncinden yüksek, yalıtkanların direncinden düşüktür. İletkenlikleri, iletken ve yalıtkan arasında bir değerde kalır [2].

Atomları belirli bir düzende sıralanmış kristal yapıdaki yarıiletken, tekli kristal (mono kristal) ya da çoklu kristal (poli kristal) olabilmektedir [2].



Şekil 1. (a) İletken, (b) Yarıiletken, (c) Yalıtkan Bant Yapısı.

## **Yarıiletkenlerin Elektrik Etki Kazanması**

Yarıiletkenlerde, herhangi bir yolla elektronlara, sahip olduğu enerjinin üzerinde bir enerji uygulanırsa, valans elektronları serbest hale geçer ve böylelikle o madde iletkenlik kazanır.

Valans elektronlara enerji veren etkenler:

- Mekanik etki
- Isı etkisi
- Elektriksel ışık etkisi
- Elektronlar ile yapılan bombardıman etkisi
- Magnetik etki

Ancak, valans elektronları serbest hale geçirecek enerji seviyeleri malzemenin yapısına göre değişir [1]:

- İletkenler için düşük seviyeli bir enerji yeterlidir.
- Yarıiletkenlerde oldukça fazla enerji gereklidir.
- Yalıtkanlar için çok büyük enerji verilmelidir.

## **Yarıiletkenlerde GaN (Galyum-Nitrat)**

Yarıiletkenler kristal yapıya sahiptirler. Yani atomları kübik kafes sistemi denilen belirli bir düzende sıralanmıştır. Bu tür yarıiletkenler içlerine bazı özel maddeler katılarak da iletkenlikleri arttırılmaktadır. Basit eleman halinde bulunduğu gibi laboratuvarında bileşik eleman halinde de elde edilir.

Bir yarıiletkeni katkılamamanın amacı, istenilen türdeki safsızlık atomlarının yarıiletken kristalde alt örgülere

yerleştirmektedir. Çizelge 1’de yarıiletken endüstrisinde kullanılan temel elementler gösterilmiştir [3].

**Çizelge 1.** Yarıiletken Endüstrinde Kullanılan Temel Elementler

I	II	III
B	C	N
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In		Sb

Yarıiletken malzemenin katkılanması sonucunda malzemede oluşan safsızlıklar malzemenin elektriksel özelliklerinde değişime sebep olurlar. Her bir safsızlık atomunun katkılanması sonucunda, yarıiletkene, serbest bir elektron veya bir deşik eklendiği varsayılır. Yeterli katkılama ile yarıiletkenler hemen hemen metaller kadar iletken olabilirler. Safsızlığın türüne bağlı olarak yarıiletkenin katkılanmış bölgesi daha fazla elektron veya deşik içerebilir. Elektronların ilettime daha çok katkı sağladığı yarıiletkenlere **n-tipi yarıiletken**, deşiklerin ilettime daha çok katkı sağladığı yarıiletkenlere ise **p-tipi yarıiletken** denir [3].

Eklenen katkı atomlara bağlı olarak yarıiletkendeki baskın yük taşıyıcı ya iletkenlik bandında elektronlar ya da valans bandında deşikler olur. İlave edilen katkı atomları mevcut enerji halleri arasında elektronların dağılımını değiştirir [1].

## **Yarıiletkenlerde Enerji-Bant Diyagramları**

Yarıiletkenlerin optik, elektronik ve yapısal özellikleri deneysel çalışmalarla belirlenmeye çalışılmaktadır. Bunun yanında deney için gerekli yatırımı yapmaksızın bazı yapıların nasıl bir özellik göstereceğini önceden tahmin etmek üzere yaygın şekilde bilgisayar benzetim(simülasyon) yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yolla, yarıiletken aygıt üretilmeden önce bilinen çeşitli parametreleri kullanılarak aygıt içindeki örneğin elektron yoğunlukları, enerji seviyeleri, dalga fonksiyonları bulunabilir [4].

Yarıiletkenler, bant özellikleri sıcaklığın birinci derece fonksiyonu olan malzemelerdir. Yarıiletkenlerin ilgi çekici özellikleri mutlak sıfırda yalıtkan özellik göstermesidir. Yarıiletken özellikler, ısısal uyarılmaların yanında, safsızlık atomlarının varlığı, kristal örgü kusurlarının yoğunluğu olması gibi nedenlerle de ortaya çıkabilirler [1].

Her bir enerji bandı, çeşitli enerji seviyeleri içerir. Yarıiletkenlerde, iletim ve değerlik bantları arasında, elektron bulunma olasılığının sıfır olduğu yasak enerji düzeylerine enerji bant aralığı denir. Yarıiletkenler enerji boşluğu 0.1 ile 3 eV arasında değişmektedir [5].

Mutlak sıfırda, yarıiletken mükemmel bir yalıtkan gibi davranır, çünkü kısmen dolu bantlar yoktur. Yani bantlar tamamen dolu ya da tamamen boştur. Ancak daha yüksek sıcaklıklarda elektronların bazıları valans bandından yasak enerji aralığını aşabilecek enerji kazanarak, boş olan iletkenlik

bandına çıkabilirler. Bu elektronlar elektriksel iletkenliğe katkıda bulunurlar. İletkenlik elektronların ve deşiklerin sayıları artan sıcaklıkla artar bu sebeple sıcaklık arttıkça iletkenlik sıcaklığı da artar [6].

Şekil 1’de gösterildiği gibi, yalıtkanlarda bant aralığı oldukça geniştir. Bant aralığı arttıkça bir valans elektronunun serbest bir iletim elektronuna dönüşebilmesi için daha fazla enerji gerekir. Yasak bölge bir yalıtkanda daha geniş iken bir yarıiletkende daha dardır. Bir miktar ısı enerjisi verilmesi ile yalıtkana oranla daha kolayca bir akım meydana getirebilir [7].

Yarıiletkenler ile yalıtkanlar, birbirlerine benzer elektriksel davranışa sahiptirler. Yalıtkanlar ile yarıiletkenleri elektriksel karakterizasyonlar bakımından birbirinden ayıran en önemli fark yarıiletkenlerde elektronların serbest hareket edebilmesi için aşılması gereken bir bant aralığının olmasıdır. Yarıiletkenlerde, yalıtkanlarda olduğu gibi oda sıcaklıklarında çok az elektron, elektriksel iletkenliğin sağlanabilmesi için gerekli olan bant aralığını aşabilmeleri için yeterli termal enerjiye sahiptir. Bu nedenle katkısız yarıiletkenler ve yalıtkanlar dışarıdan uygulanan bir elektriksel alan olmadıkça benzer elektriksel davranış gösterirler. Daha küçük bant aralığına sahip yarıiletkenlerin elektriksel özelliklerini sıcaklık ile kontrol etmek daha kolaydır [8].





## **GaN TEKNOLOJİSİ**

III-V grubu yarıiletkenleri, geniş yasak enerji aralığı ve doğrudan bant geçiş özelliğine sahip yarıiletkenlerdir [4]. Bu yarıiletkenlerin oluşturduğu bileşikler iyonik ve kovalent bağ karışımı bir özellik gösterirler. III-V grubunda bileşen atomların boyutlarının bağın iyonik karakterine olan etkisi yarıiletkenin elektronik bant yapısında önemli bir özelliği ortaya çıkarmaktadır.

### **Neden Galyum Nitrat?**

Galyum, 1950 yılından itibaren malzeme üretimi için baskın bir malzeme olmuştur.

Bunun başlıca sebepleri;

- Silikon malzemesinin yeni uygulamaları önceki malzemelerinde mümkün değildi,
- Silikon malzemesinden daha güvenilir olduğunu kanıtladı,
- Silikon malzemesinden birçok farklı yönlerden kullanmak daha kolay oldu,
- Silikon malzemesi ile üretilen aygıtlarından daha düşük maliyetli olduğunu gösterdi.

Tüm bu avantajları, Galyum üretimi altyapısı büyük bir yatırım ile mühendislik olarak Galyum-Nitrat teknolojisini ortaya çıkardı.

## Ülkemizde GaN Teknolojisi

Türkiye’de GaN üretim altyapısı kurma ve geliştirme süreci 2014’te tamamlanmış olup yeni nesil milli radarlarda kullanılacak ilk GaN transistörlerinin üretiminin 2016 yılında gerçekleştirilmiştir.

Bilkent Üniversitesi NANOTAM’da GaN teknolojisi ile yüksek güçlü GaN nanotransistörleri ve nanofabrikasyon malzeme üretilmeye başlanmıştır.

ASELSAN ve Bilkent Üniversitesi ortaklığında kurulan AB-Mikro Nano, savunma, uzay, haberleşme ve enerji sektörleri için stratejik öneme sahip GaN temelli yongalar (çipler) üretmektedir. Bu tesiste üretilen GaN temelli yongalar sayesinde hava savunma radarı, elektrikli araba, yüksek hızlı tren ve 4G/5G cep telefonu sistemleri gibi stratejik teknolojiler üretebilen dünyanın dört ülkesinden biri konumuna gelmesi hedeflenmektedir.

Yüksek Hızlı Tren, Elektrikli Arabalar, 4G ve yenilenebilir enerji için tamamen milli olarak geliştirilen yüksek performanslı yongalar, radar uygulamalarının yanında Yüksek Hızlı Tren (YHT), yenilenebilir enerji, elektrikli arabalar ve 4G cep telefon sistemleri gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Türkiye, dünyada Galyum Nitrat (GaN) yarıiletken malzemesi temelli yonga teknolojisi geliştirilebilen az sayıdaki ülkelerden birisi konumunda bulunmaktadır. ASELSAN ve BİLKENT

Üniversitesi ortaklığında kurulan AB-Mikro-Nano şirketi, elde edilen stratejik avantajı yeni ticari ürünlere dönüştürmeyi hedeflemektedir.



**Şekil 2.** Bilkent Üniversitesi NANOTAM



## GaN MALZEMESİ VE ÖZELLİKLERİ

### Galyum Nitrat (GaN) Tarihçesi

Galyum, yarı iletken olarak ilk kez 1875 yılında Fransız bilim insanı Paul Emile Lecoq de Boisbaudran tarafından keşfedildi. Bu keşif, Mendeleev'in periyodik tablosundaki boşluğu doldurdu. Galyum Nitrat (GaN) ise 1938 yılında, sıcak Galyum elementinin üzerinden amonyak geçirilerek küçük çapta kristalleştirilmesi yoluyla elde edildi.

GaN, öncelikle LED (Light-Emitting Diode, Işık Yayan Diyot) alanında kullanılmaya başlandı. 1999 yılında Amerika Birleşik Devletleri Ordusu Araştırma Laboratuvarı'nda yapılan bir elektron hızı testi sonrasında büyük bir öneme sahip oldu. Bu test, GaN içinde elektronların çok yüksek hızda (300 K'de 1500 cm<sup>2</sup>/(V·s)) hareket ettiğini gösterdi.

İlk GaN malzemeler, 2006 yılında GaN HEMT (Yüksek Elektron Hareketliliği Transistörleri) olarak tanıtılmaya başlandı. 2008'den itibaren ise bildiğimiz anlamda MOSFET (Metal-Oksit Yarıiletken Alan Etkili Transistör) olarak kullanıma sunuldu.



Şekil 3. Galyum Nitrit Transistör

## GaN Malzemesi

Galyum Nitrat, yüksek sıcaklıklarda çalışabilen yüksek güçlü transistörler için çok uygun olan ikili bir III/V doğrudan bant aralıklı yarı iletkenidir.

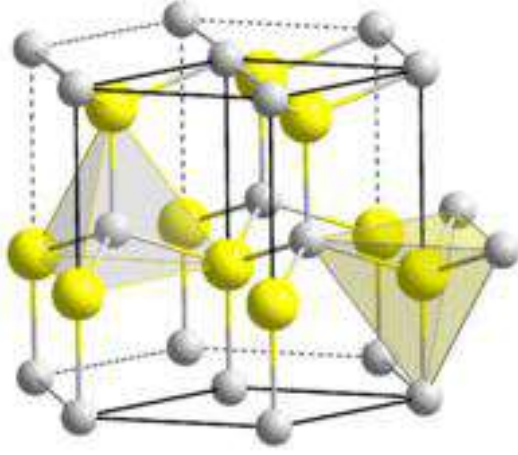
Galyum Nitrat ( $\text{Ga}(\text{NO}_3)_3$ ), Galyum ve Nitrik asidin reaksiyonu ile elde edilen beyaz veya açık sarı kristal yapıda bir bileşiktir.



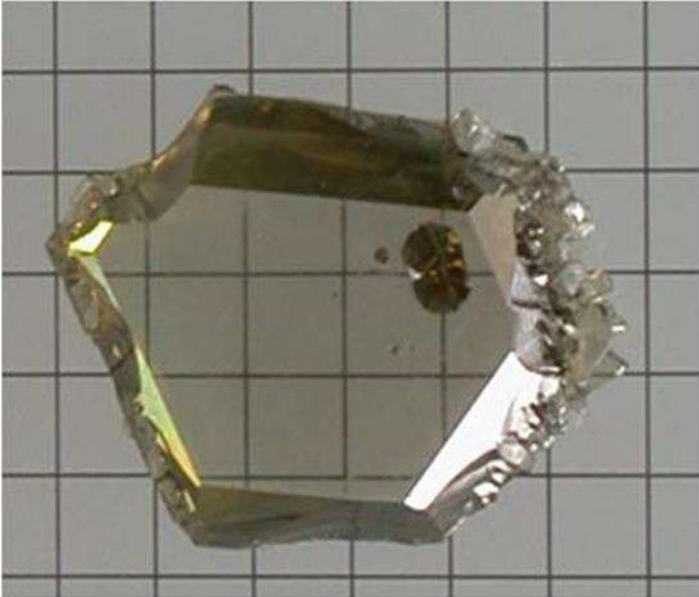
**Şekil 4.** Galyum Nitrat (marka adı Ganite), kimyasal formülü  $\text{Ga}(\text{NO}_3)_3$  olan Nitrik asidin Galyum tuzudur.

## GaN Malzemesinin Kristal Yapısı

1990 yılından bu yana, sıklıkla ışık yayan diyotlarda (LEDlerde) kullanılan GaN, III-V ikili direkt bant aralıklı bir yarıiletkenidir. Şekil 5'te gösterildiği gibi bileşimleri hegzagonal kristal yapısına sahip olan çok sert malzemelerdir. Geniş bant aralığına ( $\sim 3,4$  eV) sahip olan GaN, optoelektronik, yüksek güç ve frekans cihazlarında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır.



**Şekil 5.** GaN Malzemesine ait Kristal Yapı [9].



**Şekil 6.** GaN Kristali.



## **Galyum Nitrat (GaN) Avantajları**

Düşük ısı üretme oranı ve yüksek arıza elektrik alanına sahip GaN malzeme, yüksek sıcaklık ve yüksek güçlü elektronik cihazlar ve yüksek frekanslı mikrodalga cihazların geliştirilmesi için önemli bir malzemedir.

- **Galyum Yüksek Elektron Hareketliliği**
- **Verimli Performans**

GaN, yüksek elektron hareketliliği sayesinde daha hızlı anahtarlama hızları ve daha düşük enerji kaybı sağlar. Bu, özellikle yüksek frekanslı ve yüksek güçlü uygulamalarda önemlidir.

- **Geniş Bant Aralığı**
- **Daha Yüksek Enerji Verimliliği**

GaN'ın geniş bant aralığı (3.4 eV), daha yüksek verimlilikte çalışmasını sağlar. Bu, özellikle LED'ler ve lazer diyotlar gibi optoelektronik cihazlarda önemli bir avantajdır.

- **Yüksek Sıcaklıkta Kararlılık**

Geniş bant aralığı, GaN'ın yüksek sıcaklıklarda kararlı bir şekilde çalışmasını sağlar, bu da yüksek sıcaklık uygulamaları için idealdir.

- **Yüksek Güç Yoğunluğu**
- **Daha Küçük ve Hafif Tasarımlar**

GaN cihazları, yüksek güç yoğunluğu sayesinde daha küçük ve hafif tasarımlara olanak tanır. Bu, özellikle taşınabilir elektronik cihazlar ve elektrikli araçlar için avantajlıdır.

- **Yüksek Termal İletkenlik**

- **Etkili Isı Yönetimi**

GaN'ın yüksek termal iletkenliği, daha iyi ısı yönetimi sağlar. Bu, cihazların daha yüksek verimlilikle ve daha uzun süre çalışmasını sağlar.

- **Yüksek Frekans Performansı**

Telekomünikasyon ve Radyo Frekansı Uygulamaları: GaN, yüksek frekanslı uygulamalar için idealdir. Telekomünikasyon, radyo vericileri ve mikrodalga cihazlarda yaygın olarak kullanılır.

- **Enerji Verimliliği**

- **Daha Az Enerji Tüketimi**

GaN tabanlı cihazlar, silikon tabanlı cihazlara göre daha az enerji tüketir. Bu, enerji tasarrufu ve daha düşük işletme maliyetleri anlamına gelir.

- **Yüksek Sıcaklık Dayanımı**

- **Güvenilirlik**

GaN, yüksek sıcaklıklarda kararlı bir şekilde çalışabilir. Bu, zorlu çevre koşullarında güvenilir performans sağlar.

- **Daha Uzun Ömür**

- **Dayanıklılık**

GaN cihazları, uzun ömürlü ve dayanıklıdır. Bu, bakım maliyetlerini düşürür ve uzun vadeli güvenilirlik sağlar.

- **Optoelektronik Avantajlar**

- **Parlak ve Verimli LED'ler**

GaN, mavi ve yeşil LED'lerin üretiminde kullanılır ve yüksek parlaklık ve verimlilik sağlar.

- **Yüksek Performanslı Lazer Diyotlar**

GaN lazer diyotlar, yüksek verimlilik ve dayanıklılık sunar, bu da optik veri iletimi ve optik depolama cihazlarında önemlidir.

## **GaN MALZEMESİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

GaN malzemesi, diğer malzemelerle karşılaştırıldığında sahip olduğu yüksek bant aralığı genişliği, yüksek kırılma gerilimi alanı, yüksek ısıl iletkenlik, yüksek elektron satürasyon (emme) hızı ve yüksek erime sıcaklığı gibi özellikleri nedeniyle HEMT aygıt çalışmalarında vazgeçilmez bir malzeme haline gelmiştir.

Amano ve arkadaşları [7] tarafından, 1986 yılında, Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD) yöntemi ile GaN malzemesinin ince film halinde çok kaliteli bir şekilde büyütülmesi ve 1991 yılında Khan ve arkadaşları [10] tarafından AlGaN/GaN yapılar da 2BEG(2 Boyutlu Elektron Gazı) oluşumunun gösterilmesi ve ardından da yine Khan ve arkadaşları tarafından[11,12] sırasıyla 1993 ve 1994 yıllarında GaN temelli ilk metal yarıiletken alan etkili transistörlerin (MESFET) ve ilk hetero yapıli alan etkili transistörlerin (HFET) üretilmesi GaN temelli HEMT aygıtlara ilgiyi hızla arttırmıştır.

GaN HEMT aygıt teknolojisi, sahip olduğu yüksek çalışma gerilimi, yüksek çıkış gücü ve yüksek giriş empedansı (bir elektrik devresinde veya elektronik bileşende alternatif akıma karşı gösterilen direnci) gibi özellikleri nedeni ile yüksek güçlü ve yüksek hızlı Monolithic Microwave Integrated Circuit (MMIC) yükselteç gerektiren, uydu haberleşme sistemleri, yüksek performanslı radarlar, yüksek kapasiteli kablosuz veri iletişimin sistemleri, baz istasyonları, WiMAX sistemleri gibi gelişmiş haberleşme sistemlerinde hızla yaygınlaşmıştır.

GaN, yüksek güç ve yüksek frekans uygulamaları için bilinen en uygun yarıiletken malzemedir. Çizelge 2’de yarıiletken aygıt teknolojisinde kullanılan çeşitli malzemeler için bazı elektriksel ve mekanik özellikler görülmektedir [13]. GaN teknolojisi fiziksel özellikleri nedeniyle son yıllarda, tüm dünyada, üzerinde yoğun çalışmalar yapılan yeni bir yarıiletken malzemedir. GaN teknolojisinin hem sivil hem de askeri birçok alanda kullanılması hedeflenmektedir.

GaN malzemesi sahip olduğu yüksek bant genişliği, yüksek kırılma elektrik alanı, yüksek yoğunluk ve yüksek erime noktası gibi özellikleri nedeniyle yüksek sıcaklık ve yüksek voltaj uygulamaları için oldukça idealdir. GaN sahip olduğu bu özellikleri nedeniyle uzay uygulamaları dâhil olmak üzere her türlü yüksek güç uygulaması için vazgeçilmez bir malzemedir.

GaN malzemesinin sahip olduğu yüksek doymuş elektron sürüklenme hızı, onu diğer malzemelere göre yüksek doyum akımı ve yüksek frekans uygulamaları için de vazgeçilmez kılmaktadır.

Yarıiletken aygıt teknolojisinde malzemelerin aygıt performansına etkilerini incelemek ve malzemelerin belirli uygulama alanlarında kendi performans sınırlarını belirlemek amacıyla çeşitli değer katsayıları tanımlanmıştır. Silisyuma (Si) göre normalize edilen bu değerler Johnson, Keyes, Baliga ve Baliga HF değer katsayıları olarak bilinmektedirler. Johnson değer katsayısı, bir malzemenin yüksek güç ve yüksek frekanslarda çalışma kapasitesini tanımlamaktadır. Keyes değer

**Çizelge 2.** Yarıiletken Aygıt Teknolojisinde Kullanılan Çeşitli Malzemeler için Bazı Elektriksel ve Mekanik Özellikler [13]

Özellik	Si	GaAs	4HSiC	6HSiC	GaN
Bant Genişliği, Eg(eV)	1,12	1,43	13,26	2,86	3,39
Kırılma Elektrik Alanı, Ebr (mV/cm)	0,25	0,40	3,5	3,8	4,0
Bağlı Dielektrik Sabiti, $\epsilon_r=1$	11,9	12,5	10,1	9,66	9,50
Isıl İletkenlik, $\kappa$ (W/cm.K)	1,5	0,54	3,7	4,9	1,3
Elektron Hareketliliği, $\mu_n$ (cm <sup>2</sup> /V.s)	1350	8500	720	370	2000
Deşik Hareketliliği, $\mu_p$ (cm <sup>2</sup> /V.s)	600	400	115	101	850
Doymuş Elektron Sürüklenme Hızı, $v_d$ (x10 <sup>7</sup> cm/s)	12222,5	2	2	2	2,5
Eriye Noktası, (K)	1415	1238	3103	3103	2791
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	2,33	5,32	3,21	3,21	6,15

katsayısı, bütünleşik devrelerde kullanılan yüksek hızlı transistörlerin anahtarlama davranışının termal sınır kapasitesini tanımlamaktadır. Baliga değer katsayısı, güç transistörlerinde

iletim kayıplarını minimuma indirmek için gerekli olan kritik malzeme parametrelerini tanımlamaktadır.

Baliga değer katsayısı, güç transistörlerinde iletim kayıplarını minimuma indirmek için gerekli olan kritik malzeme parametrelerini tanımlamaktadır. Baliga yüksek frekans (Baliga HF) değer katsayısı, bir malzemenin yüksek frekans değerlerinde anahtarlama güç kayıplarını tanımlamaktadır [10,11]. Bir yarıiletken aygıtta maksimum verim için bu değer katsayılarının olabildiğince büyük olması gerekmektedir. Çizelge 3'te çeşitli yarıiletken malzemeler için değer katsayıları görülmektedir. GaN malzemesi geleneksel yarıiletkenlere göre hem yüksek frekans hem de yüksek güç uygulamalarında önemli bir üstünlük sağlamaktadır.

**Çizelge 3.** Yarıiletken Aygıt Teknolojisinde Kullanılan Çeşitli Malzemeler için Değer Katsayıları [1]

Malzeme	Johnson [(Ebr.v <sub>d</sub> /π)]	Keyes [κ.(vd/ε <sub>r</sub> )1/2]	Baliga [ε <sub>r</sub> . μn.Ebr <sup>3</sup> ]	Baliga HF [μn.Ebr <sup>2</sup> ]
Si	1	1	1	1
GaAs	7,1	0,45	15,6	10,8
4H-SiC	180	4,61	130	22,9
6H-SiCİ	260	4,68	110	16,9
GaN	760	1,6	650	77,8

GaN temelli aygıtların yüksek frekans değerlerinde yüksek güçlere çıkabilmektedir. Bu da GaN temelli aygıtları

hem yüksek güç hem yüksek frekans hem de yüksek frekanslı yüksek güç elektroniği alanında vazgeçilmez kılmaktadır.

GaN yüksek ısı kapasitesi ve ısıl iletkenliği ile çok sert, mekanik olarak sabit (stabil) geniş bant aralıklı yarıiletken malzemedir.





## **GaN MALZEME ÜRETİMİ**

GaN ve alıttaş, arasındaki örgü sabitlerindeki uyumsuzluklarına rağmen SiC ve Si malzemeler üzerine ince film olarak büyütülebilirler [14]. GaN malzemesi Si ve O ile katkılanırsa n-tipi, Mg ile katkılanırsa p-tipi olur [14]. Bununla birlikte, Si ve Mg atomları yerdeğiştirerek oluşan GaN kristal büyümesi sonucu tensile gerilme oluşur ve yapıyı daha kırılđan hale dönüştürebilir. GaN bileşikleri  $\text{cm}^2$  başına 100 milyon kadar çok büyük kusura sahiptir[15].

Yüksek kristal kaliteli GaN düşük sıcaklıkta oluşturulan tampon tabaka teknolojisi ile elde edilebilir[16]. Bu yüksek kristal kaliteli GaN, p-tipi GaN, p-n eklemli mavi/UV-LED'leri ve lazer davranışları için olanaksız olarak görülen oda sıcaklığında uyarılma emisyonunun bulunmasına sebep olmuştur[14]. Bu olay, Nitrat tabanlı transistörlerin gelişmesi için ve yüksek-performanslı mavi-LEDlerin, uzun ömürlü mor lazer diyotların ticarileştirilmesine olanak verir.

İlk GaN-tabanlı şiddetli ışık veren LED'ler için Safir üzerine MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition - Metal-Organik Kimyasal Buhar Biriktirme) ile büyütölen bir GaN ince filmi kullanılmıştır. GaN ile kullanılan alıttaş arasındaki örgü sabiti uyumu hemen hemen %2 olan diğer alıttaşlar ZnO ve SiC gibi ikililerdir [17].

GaN transistörlerin performansını arttıran büyük yasad enerji aralığı sebebiyle Si transistörlerden daha yüksek sıcaklıklara kadar GaN-tabanlı cihazlar çalışabilir. İlk GaN

metal/oksit yarıiletken alan-etkili transistörler (GaN MOSFET) 1993'te deneysel olarak elde edilmiştir ve geliştirilmiştir [18].

GaN HEMT'ler 2006'dan günümüze kadar ticari olarak önerilmişlerdir ve yüksek voltaj, yüksek güç etkileri sebebiyle çeşitli kablosuz altyapı uygulamalarında kullanılabilirler. Ayrıca yüksek frekanslı telekomünikasyon ve uzay uygulamalarında da kullanılmaktadırlar[19]. GaN tabanlı MOSFET transistörler, yüksek güç elektroniklerinde özellikle otomotiv ve elektrikli araba uygulamalarında çok avantaj sağlarlar. GaN'ın nanotüpleri, nanoçapta elektroniklerde, optoelektronik ve biyokimyasal algılama uygulamalarındaki uygulamalar için de kullanılır.

GaN, III-Nitrür yarıiletken malzeme grubuna dâhil olup III-Nitrür grubu wurtzite, zinc-blende ve kaya tuzu olmak üzere üç farklı yapıda kristalleşebilmektedir. Wurtzite kristal yapısı, birim hücresi iç içe geçmiş iki hegzagonal sıkı paket yapıdan oluşmakta olup a ve c olmak üzere iki örgü sabitine sahiptir. Wurtzite kristal yapısına sahip GaN, atomik düzenlenmeye bağlı olarak c-ekseni ([0001] yönelimi) boyunca Ga-yüzlü [0001] ve N-yüzlü [0001] olmak üzere iki farklı şekilde büyüyebilmektedir [21].

GaN'ın fotolüminesans(ışıldama ile görünür ışık yayılması) özellikleri incelenmek istendiğinde GaN'a, enerjisi, GaN'ın yasak enerji aralığı (Eg) olan 3,39 eV'dan daha yüksek olan bir lazer gönderilmektedir. Bu durumda salınan enerjinin GaN'ın yasak enerji aralığı olan 3,39 eV olması

beklenmektedir(Bkz. Çizelge 4). Ancak bazı durumlarda GaN malzemesinde harici katkılamadan (n-tipi veya p-tipi) veya malzeme içindeki safsızlıklardan dolayı oluşan donör (verici) ve akseptör (alıcı) enerji seviyelerinin uyarılması nedeniyle farklı dalga boylarında da salınım gözlenmektedir [22].

**Çizelge 4.** GaN Malzemesinin Hesaplamalarda Kullanılan Parametreleri [20].

Parametreler	GaN
Yasak enerji aralığı (eV)	3.39
Malzeme Yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )	6.150
Etkin Kütle (m* /m <sub>0</sub> )	0.21
Statik Dielektrik Sabiti ( $\epsilon_s/\epsilon_0$ )	8.9
Yüksek Frekans Dielektrik Sabiti ( $\epsilon_\infty/\epsilon_0$ )	5.35
Ses Hızı (m/s)	6560
Akustik Deformasyon Potansiyeli (eV)	8.3
Optik Fonon Enerjisi (meV)	92
Vadiler Arası Optik Fonon Enerjisi (meV)	92
Vadiler Arası Deformasyon Potansiyeli (eV/cm)	1x10 <sup>9</sup>

Çalışma prensibini kısaca açıklarsak, yarıiletken malzemelerde optik uyarılma ile meydana gelen elektron-deşik çiftleri temel enerji durumlarına dönerken kaybettikleri bu enerjiyi ışına olarak yayarlar. Bazı durumlarda malzemenin katkılanmasından dolayı (n –tipi veya p-tipi) veya içindeki safsızlık atomlarından kaynaklı valans bandı ve iletim bandı kenarında alıcı ve verici seviyeleri oluşabilir. Bu uyarılan

malzemeden farklı dalga boylarında ışımının da gelmesine sebep olabilir. Ancak asıl beklenen fotonun enerjisi yasak bant aralığı enerjisi ( $E_g$ ) kadardır.

## ÜRETİLMİŞ GaN MALZEMESİNİN ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM ALANLARI

- 1. Termal İletkenlik:** Galyum Nitrat, yüksek bir termal iletkenliğe sahiptir. Bu özellik, radar sistemlerinde ve güvenlik sistemlerinde ısı yönetimi için kritik önem taşır. Özellikle yüksek sıcaklıklara maruz kalan askeri ekipmanlar için ideal bir seçenektir.
- 2. Kimyasal Dayanıklılık:** Galyum Nitrat, birçok kimyasal maddeye karşı dirençlidir. Bu özellik, askeri cihazların çeşitli ortamlarda güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlar. Kimyasal saldırılara karşı koruma sağlamak için kullanılan zırh sistemlerinde de tercih edilen bir bileşendir.
- 3. Yüksek Yoğunluk:** Galyum Nitratın yüksek yoğunluğu, iletişim sistemlerinde ve elektronik cihazlarda kompakt tasarımların mümkün olmasını sağlar. Askeri araçlarda, sınırlı alanlarda yüksek performanslı ekipmanların barındırılmasını kolaylaştırır.

### Galyum Nitrat Teknolojisinin Askeri Alandaki Uygulamaları

Galyum Nitrat teknolojisinin askeri alandaki uygulamaları oldukça çeşitlidir ve sürekli olarak gelişmektedir.

**Radar Sistemleri:** Galyum Nitrat, radar sistemlerinde termal yönetimini iyileştirmek için kullanılır. Yüksek termal iletkenliği

sayesinde, radar sistemlerinin dayanıklılığını artırır ve uzun süreli operasyonlar için ideal bir çözüm sunar.

**Güvenlik Sistemleri:** Askeri üslerde ve tesislerde, Galyum Nitrat bazlı sensörler ve güvenlik sistemleri kullanılarak çevresel tehditlerin izlenmesi ve tespit edilmesi sağlanır. Bu sistemler, termal hassasiyetleri sayesinde gelişmiş algılama yetenekleri sunar.

**İletişim Teknolojileri:** Galyum Nitrat, askeri iletişim ekipmanlarında kullanılan yüksek frekanslı bileşenlerin termal yönetimini optimize etmek için kullanılır. Bu da iletişim sistemlerinin güvenilirliğini artırır ve uzun mesafeli iletişimde performansı iyileştirir.

Galyum Nitrat teknolojisi, askeri alanda çeşitli uygulamalarda kullanılan önemli bir bileşiktir. Yüksek termal iletkenliği, kimyasal dayanıklılığı ve yüksek yoğunluğu sayesinde, radar sistemleri, güvenlik sistemleri ve iletişim teknolojileri gibi alanlarda etkili bir şekilde kullanılabilir. Bu teknolojinin sürekli olarak geliştirilmesi, askeri kapasitelerin artırılmasına ve güvenlik seviyelerinin iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Yakın vadede GaN, güç üretimi ve soğutma gereksinimleri karşılanabilirse, çeşitli savaş filolarında kurulu AESA (Active Electronically Scanned Array-Elektronik Taramalı Aktif Dizin) radarlarının algılama menziline iki katına çıkarma fırsatı sunmaktadır [23].

Fransa, İsrail, Japonya, Türkiye, Güney Kore, İsveç, İngiltere ve ABD tarafından tasarlanan yeni savaş radarlarında GaN, yeni nesil savaş uçakları için şimdiden en umut verici yarı iletken malzeme olarak öne çıkmaktadır.

### **GaN Teknolojisinin Çalışma Mekanizması**

Bir Galyum Nitrür kristalinin üzerindeki ince Alüminyum Galyum Nitrit (AlGaN) tabakası büyütülerek arayüzde dengeleyici iki boyutlu bir elektron gazını indükleyen bir gerilim oluşturarak çalışır.

### **GaN Teknolojisinin Avantajları**

- Daha düşük iletkenlik kaybı veren düşük direnç,
- Daha az anahtarlama kaybı sağlayan daha hızlı cihazlar,
- Cihazlarınızı şarj ederken veya cihazınızın şarjı biterken daha az kayıpla sonuçlanan kapasite
- Devreleri çalıştırmak için daha az güç gerekir,
- Baskılı devre kartında daha az yer kaplayan daha küçük cihazlar.

### **GaN Teknolojisinin Kullanıldığı Sektör ve Alanlar**

- Otomotiv
- Veri Merkezleri
- Sanayi
- Havacılık ve Savunma
- Tüketici Elektronikleri
- Tıp Teknolojisi
- İletişim Sektörü

### **GaN Teknolojisi ile Üretilen Şarj Cihazları**



GaN, elektronikte yeni bir malzeme değildir. Aslında 1990'larda LED yapımında kullanılıyordu. Ancak, bu yarı iletken malzeme daha ucuz hale geldikçe birçok marka, şu anda çoğu telefon, dizüstü bilgisayar ve tablette bulunan mevcut silikon şarj teknolojisi yerine GaN şarj cihazları üretmeye başladı.

GaN, güç kaynakları ve şarj cihazlarında giderek daha fazla kullanılan yenilikçi bir yarı iletken malzemedir. Üçüncü nesil GaN yarı iletken malzeme teknolojisi ile şarj cihazının daha az ısı üretmesine ve ısı dağıtma sürecini hızlandırmasına yardımcı olur.

GaN'in en büyük avantajı, bu kadar küçük bir cihaza sığdırabileceğiniz güç miktarına sahip olmasıdır. GaN teknolojisi daha az ısı ürettiğinden, bileşenler birbirine daha yakın yerleştirilebilir ve böylece daha küçük bir boyutta daha hızlı şarj edebilirsiniz. Dizüstü bilgisayarınızı şarj etmek için büyük bir şarj başlığı, tabletinizi ve telefonunuzu şarj etmek için başka bir güç şarj başlığı taşımaktan sıkılan herkes için artık hepsini daha küçük, daha verimli bir şarj cihazıyla değiştirebilirsiniz. Bu, iş seyahatlerinin yanı sıra haftada birkaç gün ofise gidenler için de harika bir haber niteliği taşımaktadır.

GaN teknolojisi ile üretilen şarj cihazları gücü elektriğe çevirirken Silikon bazlı şarj cihazlarından üç kat daha verimlidir. Küçük ve taşınabilir olmaları, cihazlarınızı on kat daha hızlı şarj etmenizi sağlar.

GaN teknolojisinin en büyük avantajlarından biri de yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmasıdır. Bu teknoloji ile üretilen şarj cihazları ısıya uzun süre dayanır. Aynı zamanda cihazınızın yaydığı ısıyı azaltır. GaN teknolojisi, daha az enerji kullanarak güçlü cihazlar ürettiği için şarj cihazları arasında hızla popüler hale geldi. Bu teknoloji ile üretilen şarj cihazlarının, Silikon bazlı şarj cihazlarından daha çok tercih edilmesinin sebebi elektriği alternatif akıma daha verimli çevirerek daha az enerji kullanmasıdır. İşte bu yüzden GaN benzersiz bir malzemedir. Aynı zamanda GaN bileşenleri elektrik akımının içlerinden daha hızlı akmasına izin verir.

### **GaN Teknolojisi ile Üretilen Şarj Cihazları Avantajları**

- 1. İletkenlik:** GaN malzemesi Silikon'dan daha verimli bir yarıiletkenidir. Silikon, elektronikte yıllarca kullanılan bir malzeme olmasına rağmen günümüzde artık GaN, daha hızlı ve verimli olduğu için daha sıklıkla kullanılmaya başlandı. GaN şarj cihazları, daha geniş bir bant aralığına sahip oldukları için daha hızlı şarj eder. Bu elektronların bir banttan güç aktarımı yapması ve daha az enerji kaybı olduğu anlamına gelir.
- 2. Boyut:** Daha verimli bir yarı iletken servisleri yaptıkları için geleneksel şarj cihazlarından daha küçük ve kompaktırlar, fazla yer kaplamazlar.

3. **Şarj Hızı:** Geleneksel şarj cihazlarına göre üç kat daha hızlı şarj eder. Bu sayede acil durumlarda cihazlarınızı hızlıca şarj edebilirsiniz.
4. **Enerji Verimliliği:** Hızlı şarj özelliği sayesinde elektrikten tasarruf edebilirsiniz. Böylece, fazla enerji harcamadan cihazlarınızı şarj ederken tasarruf da yapmış olursunuz.

GaN şarj cihazları ile cihazlarınız daha az enerji kullanır. Bu sayede ısıya karşı çok daha iyi dirence sahip olur ve bunlar da cihazınızın uzun ömürlü olmasını sağlayacaktır.

Silikon yerine GaN kullanıldığında her şey birbirine yaklaşır. Küçük bir alana daha fazla bilgi işlem kapasitesi sığdırabilirsiniz. Böylece size güçten ödün vermeyen her yerde ve zamanda kolayca taşıyabileceğiniz güçlü, taşınabilir ve kompakt bir cihaz sunar. Kısaca, GaN teknolojisi ile üretilen şarj cihazları için yüksek güç küçük gövde denilebilir.



**Şekil 7.** GaN Teknolojisi ile üretilmiş bir şarj cihazı [24]



## **GALYUM NİTRAT TEKNOLOJİSİ GELECEĞİ**

GaN şarj cihazları Uluslararası Tüketici Elektronikleri Fuarı'nda büyük ilgi görmüştür ve bu modern silikon alternatifi, daha küçük, daha verimli şarj cihazlarının ve güç kaynaklarının ortaya çıkacağı anlamına gelmektedir.

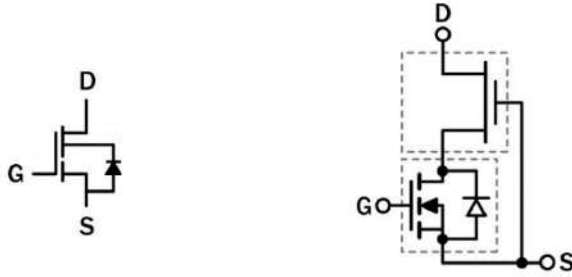
GaN şarj cihazları fiziksel olarak mevcut şarj cihazlarından daha küçüktür. Bu malzeme zamanla silikondan çok daha yüksek voltajları iletebilmektedir. GaN şarj cihazları yalnızca akımı aktarmada daha etkili olmakla kalmaz, aynı zamanda ısı nedeniyle daha az enerji kaybı olur. Bu nedenle, bileşenler cihaza enerji aktarımında daha verimli olduğunda, genellikle daha az bileşene ihtiyaç duyulur.

GaN, yakın zamanda birçok alanda silikonun yerini alacak gibi görünmektedir. Silikon üreticileri, silikon bazlı transistörleri geliştirmek için onlarca yıldır çalışmalarını sürdürmektedir. Moore Yasası'na göre entegre silikon devrelerdeki transistörlerin sayısı yaklaşık her iki yılda bir ikiye katlanır. Bu gözlem 1965'te yapılmıştır ve son 50 yıldır temelde doğru gibi görünmesine rağmen 2010 yılında yarı iletken teknolojisinin gelişimi ilk kez bu hızın altına düşmüştür. Pek çok analist (ve Moore'un kendisi), 2025 yılına kadar Moore Yasası'nın geçerliliğini yitireceğini öngörmektedir.

GaN transistörlerinin üretimi 2006 yılında arttı. Hızla gelişmekte olan üretim süreci, GaN transistörlerinin silikonla aynı tip ekipmanlarla üretilbileceği anlamına gelmektedir. Bu,

maliyetleri azaltabilir ve daha fazla silikon üreticisini transistör üretmek için GaN kullanmaya teşvik edebilir [25].

Yarıiletken teknolojisinde yeni malzemelerle birlikte gelecekte, yüksek frekans, yüksek güç ve yüksek gerilim gibi çeşitli uygulamalarda farklı malzeme türlerinden elemanlar kullanılacaktır. GaN, özellikle telekomünikasyon ve askeri alan gibi güç yoğunluğunun yüksek olduğu sektörlerde tasarımcılar tarafından kabul görmüştür. Üreticiler, kapı sürme (gate driver) kısmı oldukça karmaşık olan GaN ürünleri geliştirmeye başladılar (Bkz. Şekil 8). Bu gelişmeler, GaN'ın önümüzdeki yıllarda elektronikte önemli bir rol alacağını şimdiden göstermektedir. GaN'ın bu avantajları, onu modern elektronik, optoelektronik, telekomünikasyon ve güç elektroniği uygulamalarında vazgeçilmez kılmaktadır.



**Şekil 8.** GaN ürünleri için geliştirilmeye başlanan karmaşık kapı sürme şematığı.



## YARIİLETKEN MALZEMELERİN ÜRETİMİ

Yarı iletkenler bütünleşmiş (entegre) devrelerin en önemli yapıtaşları olduğu için günümüz teknolojik aletlerin neredeyse tamamı yarı iletkenlerden faydalanmaktadır. Bütünleşmiş devre içeren cihazlara; dizüstü bilgisayarlar, tarayıcılar, cep telefonları gibi yaygın örnekler verilebilir. Entegreler için yarı iletkenler seri üretimle üretilir.

İdeal bir yarı iletken üretebilmek için kimyasal saflık öncelikli şarttır. Kullanılan malzemelerin boyutları çok küçük olduğundan, en ufak bir kusur malzemenin davranışını olumsuz etkiler.

Kristal yapısındaki kusurlar; çizgisel, düzlemsel ve ikiz kristaller olabilirler. Bu kusurlar malzemenin yarıiletkenlik özelliklerine etki edebileceğinden kristalin mükemmel olması önemlidir. Kristal kusurları, yarıiletken malzemenin kusurlarının temel sebeplerindendir. Kristal büyüdükçe aranan kusursuzluğa ulaşmak da o kadar zorlaşır.

Günümüzde seri üretim tekniklerinde, ince diskler halinde dilimlenmiş 100-300 nm çaplı silindirik külçeleri kullanılır. Entegrelerde kullanılacak yarı iletkenlerin üretimi için mevcut yarı iletken üretim işlemlerinin karması olan bir yöntem kullanılır. Bu yöntemlerden ilki **termal oksidasyon yöntemi**dir. Termal oksidasyon yöntemi ile silikonun yüzeyinde bir silikon dioksit tabakası oluşturulur ve alınan ürün *Gate Insulator* veya



*Field Oxide* olarak kullanılır. Sıra, *Photomask* ve *Photolithography* olarak adlandırılan ve devrenin şeklinin malzeme üzerinde oluşturulmasını sağlayan işlemlere gelir. Malzemenin üzerinde şeklin oluşmasını sağlayan ışığa duyarlı maddenin yüzeyine ultraviyole ışık kullanılarak devrenin çizimi yansıtılır ve ışığa duyarlı maddede kimyasal değişimler olduktan sonra istenen sonuç alınır. Sıradaki işlem, aşındırma işlemidir. Bir önceki basamakta silikonun ışığa duyarlı malzeme ile kaplanmamış olan yüzeyi bu aşamada asit kullanılarak kazınabilir.

Günümüzde ağırlıklı olarak plazma ile kazıma yöntemi tercih edilir. Plazma kazıma yönteminde düşük basınç altında aşındırıcı bir plazma gazı kullanılır. Freon veya kloroflorokarbonlar kullanılan aşındırıcı plazma gazlarına örnek olarak verilebilir. Katot ve anot arasında oluşturulan yüksek frekanslı radyo voltajı gazın ortamda plazma haline geçmesini sağlar. Silikon ince disk (wafer), katot üzerinde yer alır ve plazma haline geçen gazdan saçılan pozitif yüklü iyonlar diske çarparlar. Sonuç olarak silikon madde an-izotropik olarak aşındırılmış olur. Son aşama difüzyon olarak adlandırılır ve yarı iletken malzemeye arzu edilen özelliklerin kazandırıldığı aşama bu aşamadır. Difüzyon aynı zamanda *katkılama (doping)* olarak da bilinir. Bu basamakta, p-n birleşme(eklem) noktalarının oluşmalarını sağlayan saf olmayan atomlar eklenir. Bu saf olmayan atomları silikon ince disklerle bütünleştirmek için

işlem 1100 °C sıcaklığında bir ortamda gerçekleştirilir. Bu basamak ta tamamlanarak yarıiletken oda sıcaklığına geri döndüğünde üretim süreci tamamlanmış olur. Artık yarıiletken malzeme bütünleşmiş devredeki yerini almaya hazırdır.

### **Yarıiletkenlerin Fiziği**

Yarıiletkenleri, metal ve yalıtkan arasında yer alan eşsiz iletkenlik özellikleri ile önceki bölümlerde tanımlamıştık. Metal ve yalıtkan arasındaki farkla, elektronların yörüngelerindeki kuantum durumları incelendiğinde anlaşılabilirler. Bu kuantum durumları malzemenin elektron yapısıyla ilintilidir. Elektrik iletkenliği ortaklaşa kullanılmış elektronların sayısı ile artar. Fakat elektronların hareket edebilmesi için ilgili yörüngeler, sadece belli bir zaman boyunca bir elektron bulunduracak şekilde yarı dolu olmalıdır. Eğer yörünge sürekli olarak bir elektron ile doluysa, diğer elektronların bu alanı kullanarak ilerlemeleri engellenmiş olur.

Bir kuantum bölgesi ancak ve ancak enerjisi Fermi seviyesinde ise kısmi dolu olabileceği için bu kuantum bölgelerinin enerji seviyeleri kritiktir. Fermi Dirac istatistiği bu durumu açıklar. Bir malzemenin iyi bir iletken olması, fazla sayıda kısmi dolu ve ortaklaşa kullanılmış orbitaller (yörüngeler) içermesinden kaynaklanır. Metaller, fazla sayıda enerjisi Fermi seviyesine yakın olan kısmi dolu yörüngelere sahip oldukları için elektriği iyi iletirler. Tersine, yalıtkanlar az sayıda kısmi dolu yörüngeye sahiptirler ve yalıtkanların Fermi

seviyeleri elektron enerji seviyeleri arasında yer almaktadır. Bir yalıtkan ısıtılarak bir iletken haline getirilebilir. Çünkü ısıtma bazı elektronların enerji boşluğunu aşmaları için gereken enerjiyi sağlayabilir.

Yapısal bir yarıiletken, oda sıcaklığında, bir yalıtkana göre daha küçük bir enerji boşluğu taşır ve bu de önemli sayıda elektronun boşluğu aşabilecek şekilde uyarılmasına olanak tanır. Fakat arı(saf) bir yarı iletken ne iyi bir iletken ne de iyi bir yalıtkan olduğu için kullanışsızdır. Ancak yarıiletkenlerin (ve bazı yarıyalıtkan olarak da bilinen bazı yalıtkanların) önemli özelliklerinden biri iletkenliklerinin *doping* (saf olmayan katkılar ilave edilmesi) veya *gating* (elektrik alan uygulanması) ile kontrol edilebilmesidir. Doping ve gating ya değerlik kuşağını ya da iletim kuşağını Fermi enerji seviyesine yaklaştırarak kısmi dolu durumların önemli bir oranda artmasını sağlar. Enerji boşlukları nispeten daha geniş olan yarıiletkenler, yarıyalıtkanlar olarak da anılırlar. Katkısız olduklarında yalıtkanlara yakın bir iletkenliğe sahipken katkılama ile yarıiletken haline getirilebilirler. Yarıyalıtkanların mikro elektronikte HEMT alttaşı gibi uygun kullanım alanları vardır. Galyum Arsenit yaygın bir yarıyalıtkan örneğidir. Titanyum Dioksit gibi bazı maddeler geniş enerji boşluklu yarı iletken olarak sınıflandırılmalarına karşın bazı alanlarda yalıtkan olarak da kullanılabilirler.

## Yarıiletkenlerin Katkılanması (Doping)

Yarı iletkenlerin iletkenlikleri kristal kafes yapılarına arı olmayan maddeler eklenerek kolaylıkla değiştirilebilir. Yarı iletkene kontrollü olarak arı olmayan madde ilave edilmesi işlemleri katkılama (doping) olarak adlandırılır. Saf yarı iletkene eklenecek safsızlık miktarı (dopant) maddenin iletkenliği ile değiştirir. Katkılı yarı iletkenler dışsal (extrinsic) olarak da adlandırılır. Saf bir yarı iletkene saf olmayan maddeler eklenerek malzemenin iletkenliği binlerce veya milyonlarca kat değiştirilebilir. 1 cm<sup>3</sup>'lük bir metal veya yarı iletken örneği 10<sup>22</sup>'nin katları seviyesinde atom içerir. Metallerde her atom iletkenlik için en az bir elektron verdiğinden dolayı 1 cm<sup>3</sup> metal 10<sup>22</sup>'nin katlarında serbest elektron içerir. 20 °C sıcaklıktaki Germanyum ise 4.2 x 10<sup>22</sup> atom içerirken 2.5 x 10<sup>13</sup> serbest elektrona ve 2.5 x 10<sup>13</sup> oyuğa sahiptir. %0,001 Arsenik ilavesi Germanyum'a 10<sup>17</sup> serbest elektron kazandırır ve bu da aynı hacimdeki Germanyum'un elektrik iletkenliğini 10000 katına çıkarır.

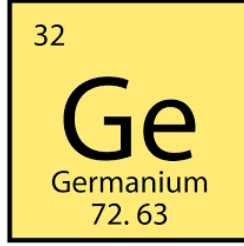
Katkı maddesi olarak seçilecek maddeler hem kendi özelliklerine hem de eklenecekleri yarı iletkenin özelliklerine bakılarak belirlenir. Genelde katkılar yaptıkları etkiye göre elektron verici veya alıcı olarak sınıflandırılır. Elektron vericiler ile katkılanmış yarı iletkenler n-tipi olarak adlandırılırken alıcılar ile katkılandırılmış yarı iletkenler p-tipi olarak bilinir. n ve p tipleri malzemenin ana yük taşıyıcısının ne olduğunu

belirtir. Zıt yüklü taşıyıcı da azınlık olarak isimlendirilir. Isı uyarımı dolayısıyla ortamda bulunmasına rağmen ana yük taşıyıcıya göre oldukça az sayıdadır. Örneğin, saf Silikon komşularıyla kolaylıkla bağ kurabilen dört değerlik elektronuna sahiptir. Silikon'da en yaygın katkı maddeleri grup III ve grup V elementleridir. Bütün grup III elementleri üç değerlik elektronu taşıdığından Silikon'a elektron alıcı olarak eklenirler. Bir elektron alıcı; kristalde bir Silikon atomunun yerini aldığıında, kristal boyunca hareket edebilen ve yük taşıyıcı gibi davranabilen bir oyuk oluşturur. Grup V elementleri beş değerlik elektronu taşırlar ve elektron verici olarak kullanılırlar. Kristalde bir Silikon atomunun yerine bir grup V atomu yerleştirildiğinde bu atom Silikon'a bir serbest elektron vermiş olur. Sonuç olarak, Bor ilave edilmiş Silikon p-tipi yarı iletken olurken fosfor ilave edilmiş silikon n-tipi yarı iletken olur. Üretim sırasında, istenilen katkı maddesi gaz halde iken yarıiletkenle temas ettirilerek difüze edilebilir. Katkıyı en iyi bir biçimde yapmak için de iyon yerleştirme tekniği uygulanabilir.

### **Safılaştırma İşlemi**

Elektronik elemanlarda en yaygın olarak kullanılan yarıiletkenler Germanyum ve Silisyum elementleridir. Yarıiletken malzemeler; iletkenlerden  $10^{-10}$  defa az iletken, yalıtkanlara göre  $10^{14}$  defa daha fazla iletkenlerdir. Yarıiletkenler iletkenlerle yalıtkanlar arasında yer almaktadır.

Germanyum maddesi, bazı cins maden kömürünün baca tozlarından ve/veya Çinko rafine endüstrisi yan ürünlerinden elde edilir.



Şekil 9. Germanyum Sembolü

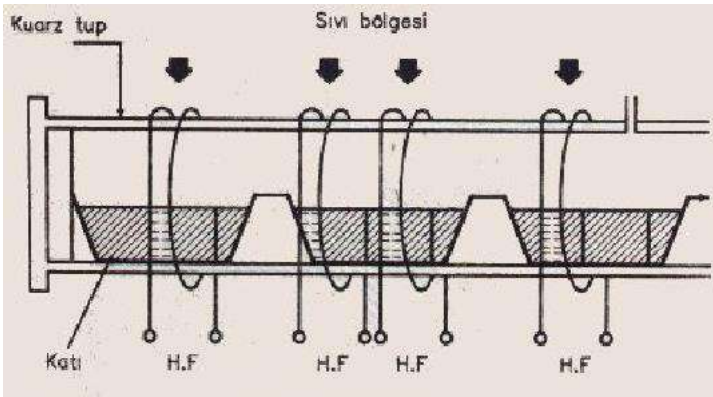


Şekil 10. Germanyum Minerali

### **Germanyumun Saflaştırılması**

Germanyumun yarıiletken olarak kullanılabilmesi için öncelikle içindeki yabancı madde oranının 1/100.000.000'un altına düşürülmesi gerekmektedir. Bunun için *bölgesel saflaştırma* işlemi yapılır. Germanyum'un saflaştırılmasında en çok uygulanan yöntem bölgesel saflaştırmadır. Çubuk şekline

getirilmiş, yaklaşık 100 gram ağırlığındaki Germanyum Şekil 11'de görüldüğü gibi özel bir pota içerisine konularak, saatte 5-6 cm'lik hızla, indüksiyon yolu ile ısıtılan bir fırının içerisinden geçirilir. Isıtıcı sistem, Germanyum'un erime derecesi olan  $936^{\circ}\text{C}$  'ye ayarlanmıştır. Isıtıcı bobinin altında eriyen katı yavaşça soğur, saf kristal ayrışır ve yabancı maddeleri erimiş bölgede bırakır. Bu işlem yeniden kristalize edilen katının saflığı istenen düzeye gelene kadar tekrarlanabilir. Yüzde 99.9999 oranına kadar saflık elde etmek mümkündür. Bu halde Germanyum henüz polikristaldir ve yarıiletken devre elemanı yapımında kullanılabilmesi için monokristal yapı şekline getirilmesi gerekmektedir.



**Şekil 11.** Germanyum'a Uygulanan Bölgesel Safılaştırma İşlemi

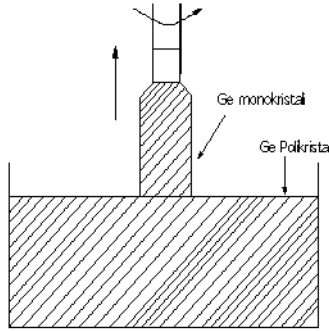
### **Germanyum'un Monokristal Hale Getirilmesi**

Germanyum ve Silikon ancak monokristal haline getirildikten sonra diyot, transistör ve bütünleşik devrelerin

üretiminde kullanılabilir. Monokristal, tek tip kristal anlamına gelir.

Germanyum monokristal yapısı oluşturulurken, poli kristalli

saf Germanyum grafit bir pota içerisinde ergime derecesine kadar ısıtılır. Ergimiş Germanyum içerisine, Şekil 12’de görüldüğü gibi monokristal halindeki Germanyum çubuk daldırılıp yavaş yavaş döndürülerek çekilir. Çekme işlemi ilerledikçe, eriyik halindeki Germanyum da yüzeysel gerilim etkisiyle çubuk etrafında toplanır ve aynı zamanda çubuğun kristal yapısına uygun olarak katılır. Bütün eriyik katılınca kadar aynı işlemle çekmeye devam edilir. Sonunda, monokristal yapıya sahip bir germanyum kitlesi ortaya çıkar.

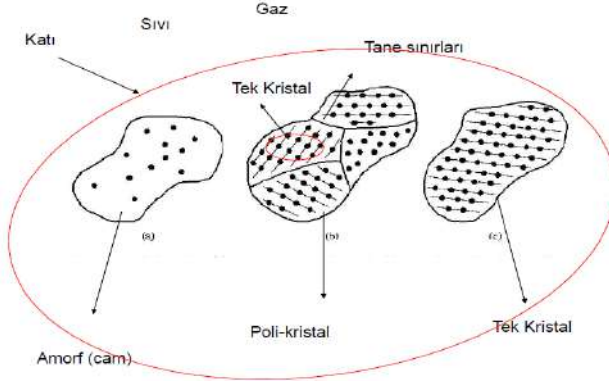


**Şekil 12.** Germanyum'un Monokristal Hale Getirilmesi



## Yarıiletken Kristalizasyonu

Yarıiletken, doğada basit eleman halinde bulunduğu gibi laboratuvarında bileşik eleman halinde de elde edilir. Yarıiletkenler kristal yapıya sahiptirler. Yani atomları kübik kafes sistemi denilen belirli bir düzende sıralanmıştır.



**Şekil 13.** Yarıiletken Kristalizasyonu

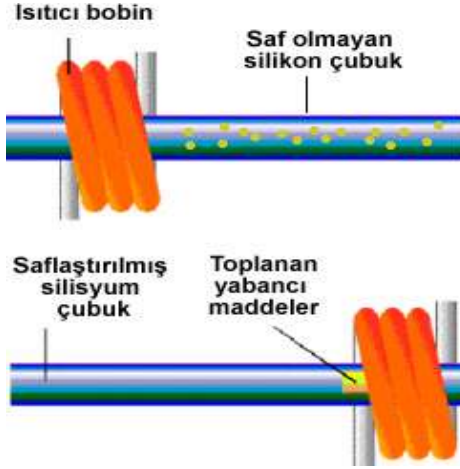
## Yarıiletken Karakterizasyon Cihazı

Yarıiletken malzeme ve bu malzemelerden yapılan diyot, transistor gibi elektronik aygıtların akım-gerilim (I-V) özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan cihaz, windows işletim sistemi altında çalışan ara yüzey birimi ile gerçek zamanlı grafik sunumuna sahiptirler.

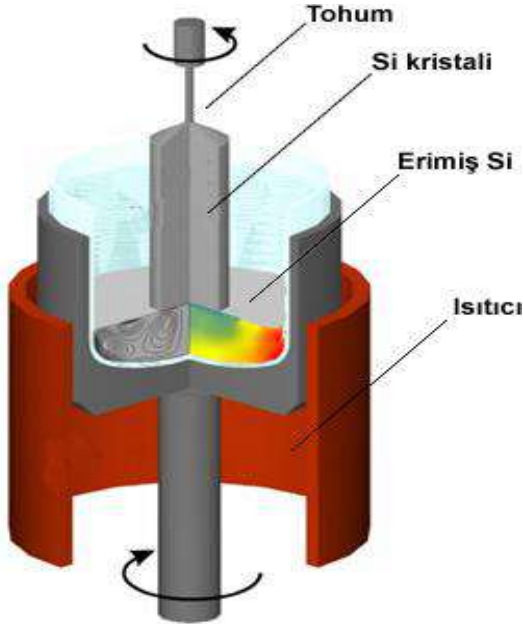
## Silikonun Elde Edilişi ve Saflaştırılması

Silikon, doğada Silika (kuartz veya kum) halinde bol miktarda bulunur. Silikon, Germanyum için anlatılan yöntemle saflaştırılmaz. İçerisinde bulunan Bor, *bölgesel saflaştırma* yolu

ile tamamen alınamamaktadır. Saflaştırma işlemi çok uzun sürmektedir.



**Şekil 14. Silikon'a Uygulanan Bölgesel Saflaştırma İşlemi**



**Şekil 15. Silikon'un Monokristal Hale Getirilmesi**



## **YARIİLETKEN MALZEME ÜRETİM TEKNİKLERİ**

19. yüzyılda yarıiletkenlerin özelliklerinin keşfedilmesi, günümüz teknolojisinin hızla ilerlemesini sağlayan en önemli etkenlerden birisi olmuştur. Teknolojinin gelişmesi ile yarıiletken malzeme üretim teknikleri de hızla gelişmiş ve birçok alternatif yöntem ve yol bulunmuştur. Çok geniş bir yelpazede kullanım alanına sahip olan yarıiletkenlerden elde edilen performans oldukça önemli bir parametredir. Bunun nedeni elde edilen performansın üretim teknikleriyle doğrudan ilişkili olmasıdır. Üretim teknikleri ve üretim koşullarındaki farklılıklar üretilen yeni malzemeye de birçok üstün özellikler kazandırmaktadır.

Yarıiletkenler, iletkenlikleri iletken ve yalıtkan arasında değişebilen malzemelerdir. İletken ve yalıtkanlarda serbest elektronların yoğunluğu çok fazla değiştirilemezken yarıiletkenlere katkı atomları (doping) eklenerek serbest elektron yoğunluğu değiştirilebilir.

Yarıiletkenleri önemli ve kullanışlı kılan en karakteristik özelliği değerlik elektronlarının ısı, ışık, ses, elektrik ve/veya magnetik etki gibi etkenlerle iletkenlik kazanmalarıdır [26]. Yarıiletken çeşitliliğinin artmasını sağlayan esas gelişmelerin başında ince film üretimi üzerine yaşanan gelişmeler gelir. İnce filmlerin üretim tekniklerindeki çeşitlilik, elektrik, optik ve magnetik özellikleri farklı olan yeni malzemelerin üretilmesini sağlamıştır. Son yıllarda yapılan fotovoltaiik hücrelerin çeşitlendirilmesi ve verimliliğinin artırılması, farklı

optoelektronik özelliklere sahip ince film üzerine yapılan çalışmaların sayısında artışa sebep olmuştur.

İnce film, kalınlığı 10 nm ile 1 µm arasında değişen bir alttaş ve alttaş üzerine kaplama yapılarak oluşturulan yüzeylerdir. İnce filmler ekonomik değeri yüksek birçok teknolojik ürünün üretilmesinde kullanılmaktadır.

Yarıiletken teknolojisi, günümüzde ince filmlerin en geniş uygulama alanı içerisindedir. Elektronik aygıt teknolojisinde çok yaygın olarak kullanılan bu teknoloji ile mikrometre ölçeğinde üretilen ince filmler, malzemenin mekanik özelliklerini ve yüzey kalitesini artırır. Diyot, transistör gibi mikroelektronik aygıtlar, sensörler ve fotovoltaik sistemlerde nanometre seviyesinde ince filmler kullanılır.

Yarı iletken teknolojilerinde, temiz odalarda kullanılan ince film biriktirme işlemleri ile belirli malzemeler alttaşlara kontrollü bir şekilde kaplanır. İnce film, bir nanometreden az (tek tabaka) veya birkaç mikrometre kalınlığa kadar değişen bir malzeme tabakasıdır. Özellikle metal oksit ince filmler, yarı iletken teknolojisinde önemli bir yere sahiptir.

Yarıiletken ince filmler katı, sıvı ve gaz fazında farklı tekniklerle üretilirler. Bu kitapta bilinen tüm yaygın yöntemlere kısaca değinilecektir.

## **İnce Film Üretim Teknikleri**

İnce filmler, farklı üretim teknikleri kullanılarak kaplanacak malzemenin atomlarının ya da moleküllerinin, filmi

destekleyerek filmin oluşumuna yardımcı olan bir taban üzerine dizilmesi ile ince bir tabaka halinde oluşturulan ve kalınları genel olarak 1  $\mu\text{m}$ 'nin altında olan malzemelerdir [27].

İnce film üretimi, entegre edilecek malzemeye göre pahalı olmayan bir yöntemdir [28]. Burada amaç, üretilmek istenen büyük ve geniş bir numune değil kaplanmak istenen alttaş malzemeye uygun kolayca biriktirme işlemi yapmaktır.

İnce filmler beklenen fonksiyonları gösterebilmeleri için uygun kalınlık, bilişim ve karakteristik özelliklere sahip olmalıdırlar [28]. Dolayısıyla, farklı üretim metotları ve birbirinden farklı alttaş malzemelerin üzerine üretimi denenerek daha kaliteli ince filmlerin üretim çalışmaları yapılmaktadır.

Bilimsel ve endüstriyel çalışmalar için önemli bir yere sahip olan ince filmler, ilk olarak, cam ve seramikler üzerinde dekorasyon olarak kullanılmıştır. Daha sonra, gümüş tuzları kullanılarak, cam yüzeyler üzerinde gümüş filmleri elde edilmiştir.

İlk ince film, 1838'de elektroliz yöntemi ile elde edilmiş olup, daha sonra 1852'de Bunsen kimyasal reaksiyon yöntemiyle, Faraday asal gaz içerisinde buharlaştırma yöntemiyle, Nahrwold ve Kundt Joule ısıtması yöntemiyle yine ince film elde etmişlerdir. Ancak, ince filmler üzerinde yapılan bu çalışmalar, vakum cihazlarının gelişmesine kadar laboratuvar çalışmaları olarak kalmıştır. Vakum cihazları geliştirildikten sonra, modern yöntemlerle elde edilen ince filmlerin; kristal yapıları, elektriksel ve optik özellikleri araştırılmaya

başlanmıştır. Temel olarak ince film üretim teknikleri, malzeme yüzeylerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin değiştirilmesine imkân sağlayan depolama teknikleri, depolanacak olan malzemesinin bulunduğu fiziksel hale göre, çeşitli alt gruplara ayrılmaktadırlar[28]:

- Buhar Fazda Büyütme
  - Buharlaştırma
  - Sıçratma
- Kimyasal Buhar Biriktirme
- Sıvı Fazda Büyütme
  - Sol-Jel Yöntemi
  - Kimyasal Banyo Metodu
    - ▶ Elektrokimyasal Yöntem
- Katı Fazda Büyütme
  - Mekanik Aşındırma
  - Devitrifikasyon

### **Buhar Fazda Büyütme**

Buhar fazında kaplama teknikleri iki grupta incelenir:

- i. Fiziksel Buhar Biriktirme (Physical Vapour Deposition - PVD)
- ii. Kimyasal Buhar Biriktirme (Chemical Vapour Deposition - CVD)

Buhar fazda büyütmede, kaplamaya veya malzemeye herhangi bir sınırlama getirilmeden yüksek kalitede kaliteli kaplamalar elde edilir.

## **Fiziksel Buhar Biriktirme (Physical Vapour Deposition - PVD)**

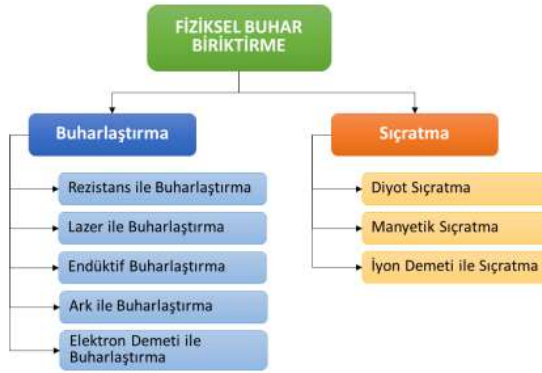
En yaygın olarak kullanılan buhar biriktirme yöntemi bu yöntemdir. Genel olarak bilimsel araştırmaların yanında hem endüstride hem de yüksek teknoloji gerektiren uygulamalarda geniş bir uygulama alanı vardır. Bu yöntemde temel olarak üretilecek ince filmin kaynağı fiziksel yöntemler kullanılarak buharlaştırılmaktadır.

Sıçratma teknikleri de bu yöntemle bağı teknikler olarak görülmektedir. Bu aşamada genelde termal ve sıçratma temelli kaynaklar kullanılmakla birlikte, alternatif buharlaştırma kaynakları da görülmektedir. Bu yöntemin etkinliğinin artması için yüksek ya da ultra yüksek vakum ortamları tercih edilmektedir. Şekil 16'da fiziksel buharlaştırma yönteminin başlıca kolları gösterilmiştir.

Günümüze kadar geliştirilen farklı kaplama işlemleri ile uygulanan bu tekniğin mekanizması; ilk olarak vakumlu ortamda, bir ısıtıcı ile buharlaştırılan kaplayıcı malzeme, kaplanacak olan malzeme üzerinde ince bir film katmanı halinde biriktirilmesi ikincil olarak ta, katı haldeki ham madde yüksek enerji ile iyonlaştırılmış ve reaktif gazlarla oluşturulmuş plazma haline getirilerek, kontrollü olarak, kaplanacak malzemenin üzerine yapıştırılması, işlemleri olarak özetlenebilir.



Vakum ortamında katı veya sıvı halde bulunan malzemelerin buharlaştırılarak veya sıçratılarak atomlarının yüzeyden koparılması ve kaplanacak olan alttabaka malzemesi yüzeyine atomsal veya iyonik olarak biriktirilmesi esasına dayanan fiziksel buhar biriktirme yöntemi *Buharlaştırma* ve *Sıçratma* olmak üzere iki grupta incelenmektedir.



**Şekil 16.** Fiziksel buharlaştırma yönteminin kapsamını oluşturan ince film üretim teknikleri [29].

## **Buharlaştırma**

Her maddenin ayırt edici bir özellik olan erime, kaynama ve buharlaşma sıcaklıkları gibi fiziksel özellikleri vardır. Buharlaştırma ile üretim tekniğinde, öncelikle, ince bir film halinde kaplama yapmak istediğimiz malzeme, buharlaşması için Şekil 17’de gösterildiği gibi bir vakum odasında alınarak gereken sıcaklığa kadar ısıtılır. Daha sonra ısıtılarak buharlaştırılan malzemenin daha soğuk sıcaklık bölgesindeki alttaşlar üzerine taşınarak yoğunlaştırılması işlemi yani

buharlaştırma gerçekleşir. Buharlaştırma yöntemine göre malzeme çeşitli şekillerde ısıtılarak buhar fazı oluşturulur. Oluşan buhar, düşük sıcaklık bölgesine doğru taşınır ve burada bulunan taşıyıcılar üzerine yoğunlaşır. Bu işlem yüksek vakum ortamında yapılabildiği gibi asal bir gaz ortamında da gerçekleştirilebilir.

Buharlaştırma tekniğinde, en iyi sonuçların elde edilmesi için yüksek ya da ultra yüksek vakum ortamları tercih edilir. Böylece, vakum ortamında basıncın çok düşük olmasından kaynaklı ortamda bulunan serbest haldeki parçacık sayısı oldukça azdır ve böylelikle termal temelli buharlaşma yöntemleri çok daha düşük sıcaklıklarda ve daha az enerji gerekerek gerçekleşebilmektedir. Bunun temel nedenlerinden biri de parçacık yüzeyine çarpan serbest molekül oranının azalmasıdır. Malzemenin yüzeyine daha az molekül çarpması malzemenin enerji kaybetmesini engellemektedir. Dolayısıyla ısıtma esnasında enerji kaybına uğramamaktadır.

Atomlar ve moleküller özellikle gaz fazda oldukları ortamda hareket ederken sürekli birbiri ile çarpışırlar. Atomların ya da moleküllerin çarpışmadan hareket edebileceği ortalama rotaya ortalama serbest yol (mean free path) denmektedir.

Basıncın yüksek olduğu ortamda atomlarda atomların ya da moleküllerin aldığı ortalama serbest yol kısalırken, basıncın düşük olduğu özellikle yüksek vakum ortamlarında ortalama serbest yol uzamaktadır. Nanomalzeme ve ince film oluşum

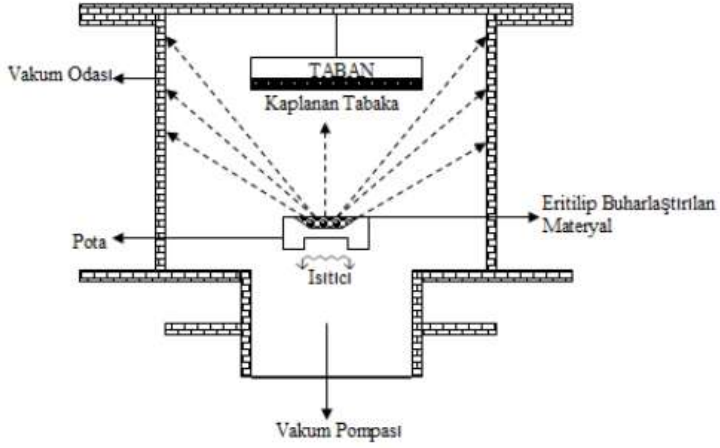
sürecinde oldukça etkili olan bu durum, atomların ya da moleküllerin enerjilerini kaybetmemesini sağlar.

Buharlaştırma tekniğinde, yüksek ya da ultra yüksek vakum ortamları tercih edilmesinin bir diğer sebebi ise, yüksek vakum ve ultra yüksek vakum ortamlarında serbest halde ortamda dolaşan molekül sayısının oldukça az olmasıdır. Bu durum, kaplama sırasında bir kirliliğin (kontaminasyon) oluşma ihtimalini minimize etmektedir.

Yarıiletken endüstrisinin gelişimi ile kendine endüstride geniş bir yer bulan fiziksel buhar biriktirme tekniği, günümüzde mikro-elektronik, tıp, dekoratif amaçlı karartma (oksidasyon) ve korozyona karşı direnç gerektiren uygulamalar gibi pek çok farklı alanda kullanılmaktadır [28].

Buharlaştırma işlemi kullanılarak elde edilen fiziksel buhar biriktirme kaplamalar; rezistans, indüksiyon, ark, elektron bombardımanı ve lazer ile buharlaştırma olarak gruplandırılmaktadır.

Buharlaştırma esaslı yöntemlerin temelinde katı, sıvı ve gaz olarak bilinen maddenin temel halleri gibi fiziksel özellikleri göz önünde bulundurulur. Bu teknikte maddeler buhar fazına geçirilerek hedeflenen yüzeye ya da alttaşa (taban malzemesi) uygulanır. Uygulama için malzemeler farklı şekillerde buharlaştırma işlemine tabi tutulur. Soy gaz olarak sıklıkla argon gazı kullanılır. Soy gazlar kararma, kirlenme ve diğer kimyasal etkileşimleri önler. Bu işlem için Şekil 16'da sıralanan buharlaştırma yöntemleri uygulanabilir.



Şekil 17. Buharlaştırma yöntemi [30]

**Rezistans ile buharlaştırma işlemi**, yüksek akım ve düşük potansiyel veren enerji sistemlerinin kullanıldığı, maliyeti düşük ve hızlı bir fiziksel buhar biriktirme işlemidir. Rezistans ile buharlaştırma yönteminde iyonlaşmanın çok az olması nedeniyle kaplamanın yüzeye bağlanabilirliği düşük, gözenekliliği ise yüksektir. Elde edilen kaplamalar daha çok optik ve dekoratif amaçlı uygulamalar için kullanılmaktadır.

**Endüktif buharlaştırma işlemi**, ısı kaynağı olarak etrafı bobinlerle sarılmış olan bir potanın kullanıldığı yöntemdir. Soğutma işlemi için bu bobinlerin etrafına sarılmış su boruları kullanılır. Bobinlere uygulanan indüksiyon akımı ile potanın çevresinde bulunan malzeme indüklenir ve böylece malzemenin sıcaklığı artarak buharlaştırma için gereken ısı oluşturulabilir. Sonuç olarak kaplanacak malzemenin buharlaşması sağlanır.

**Ark ile buharlaştırma işlemi**, güç kaynakları tarafından üretilmiş arklar ile malzeme üretilmesine dayanır [32]. Sistem esas olarak vakum ortamında gerçekleşir. Katoda ve anoda ayrı ayrı güç kaynakları tarafından yüksek akım uygulanır. Akımın uygulandığı anoda kaplanmak istenen malzeme yerleştirilir. Anot ve katot arasında oluşan gerilim sayesinde katot ve anot arasında bir ark oluşur. Bu ark, katottan anoda doğru kopan malzemelerin gönderilmesine olanak tanır. Aynı zamanda ortama reaktif bir gazın da verilmesi ile birlikte arkın etkisi arttırılabilir. Ark oluştuğu anda ince film kaynağı olan katot yüzeyinde, sıcaklık 2000-2500°C ye kadar çıkabilir [32].

**Elektron bombardımanı ile buharlaştırma işlemi**, bir elektron kaynağı vasıtası ile sağlanan yüksek enerjili elektronların, hedef malzemeye yönlendirilmesi sonucunda açığa çıkan enerjinin malzemeyi buharlaştırması prensibine dayanır. 4000 °C'ye kadar yüksek ergime sıcaklıklarına sahip malzemelerin buharlaştırılabilmesine olanak tanıyan bu yöntemde elektronların yönlendirilebilmesi sağlanır ve böylece düzenli buharlaştırma oluşturabilen bir bombardıman söz konusu olur.

Elektronlar, elektron tabancası veya oyuk katot kullanılarak üretilmektedir. Elektron tabancası ile elektronların üretimi, bir flamanın akım geçirilmesi neticesinde flamanın ısınarak elektron yayması prensibine dayanmaktadır. Elde edilen elektronlar bir magnetik alan yardımı ile hızlandırılır ve yönlendirilir. Bu taranarak

buharlaştırma yapılmasına olanak tanır. Buna ek olarak, oyuk katot kullanımı ile elektron üretimi ise oyuk bir silindir içerisinde soy gazların kullanılması ile oluşturulan plazma sayesinde gerçekleştirilir.

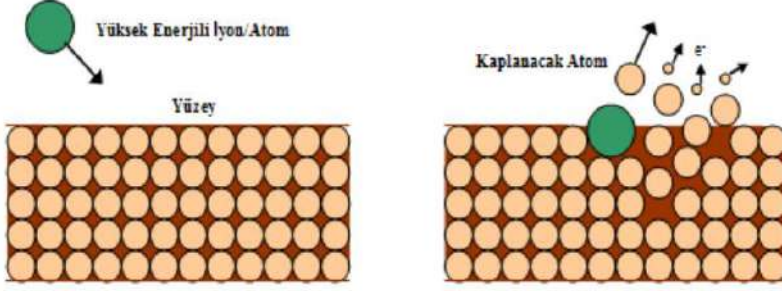
**Lazer ile buharlaştırma işlemi**, güçlü bir lazer ile sağlanır. İşlem genelde vakum ortamında gerçekleştirilir. Buharlaştırılmak istenen malzeme bir platform üzerine yerleştirilerek lazer malzemenin üzerine yönlendirilir. Lazer etkisi ile malzeme buharlaştırılarak kaplama yapılmak istenen yüzeye yönlendirilir [31]. İşlem, vakum ortamında yürütülürse buharlaştırma çok daha hızlı ve verimli şekilde gerçekleştirilebilir.

## **Sıçratma**

Sıçratma yöntemi, hedef malzeme yüzeyinin, genellikle plazma veya iyon tabancası aracılığı ile hızlandırılmış atomik boyuttaki yüksek enerjili gaz iyonlarıyla bombardıman edilerek, şekil 18'de görüldüğü gibi atomların yüzeyden sıçratılması ve hedef malzeme yüzeyinden koparılan atomların buhar fazına geçerek alttabaka malzemesi üzerine biriktirilmesi esasına dayanır.

Sıçratma yöntemin temel prensipleri yakın zamanda aydınlatılsa da yöntemin kökeni 19. yüzyıla kadar dayanmaktadır. Grove, bu yöntemi 1852'de doğru akım deşarj tüpünü kullanarak gerçekleştirmiştir [29]. Grove, deşarj tüpü

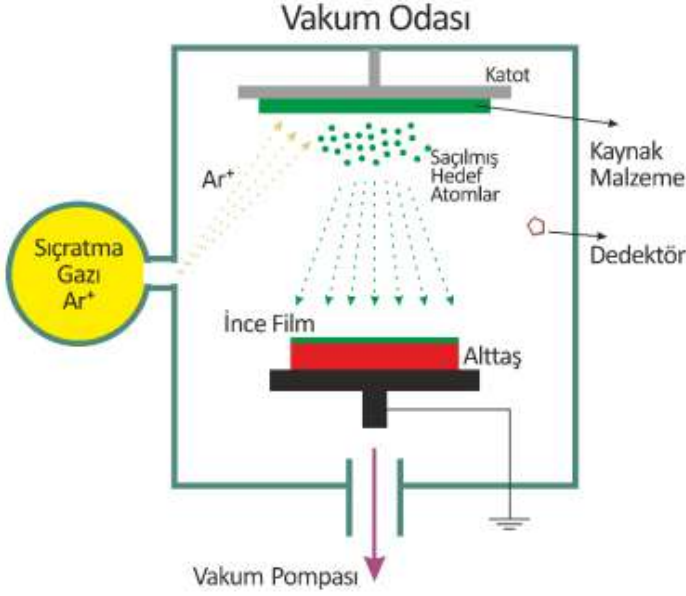
içindeki katodun üzerine yüksek enerjili iyonlar fırlatarak katottan kopan tanecikleri tüpün içinde biriktirmiştir.



Şekil 18. Sıçratma mekanizması [33]

Günümüzde küçük ölçüde kaplama yapan sistemler olduğu gibi daha büyük boyutlarda kaplamaların yapılmasına imkân veren sistemler de geliştirilmiştir. Bu işlem sırasında hızlandırılmış küçük boyutlardaki plazma veya iyonlar kullanılır. Şekil 19'da gösterildiği gibi vakum odasına Argon gazı konularak plazma üretildiğinde, kaplamada kullanılacak kaynak malzeme ile çarpışmak üzere argon iyonları ( $Ar^+$ ) oluşturulur. Argon iyonları gibi yüksek enerjili tanecikler biriktirme malzemesine göre daha yüksek enerji seviyelerine sahiptir. Böylece kaynak malzeme parçalanarak taban malzemesine yapışır. Kaynak malzemenin yüzeyindeki atomlar, bu küçük taneciklerle bombardıman edilerek atomların katı yüzeyinden koparılıp fırlatılması sağlanır. Daha sonra kopan bu atomlar buharlaştırılarak alttaş üzerinde biriktirilir. Bu nedenle sıçratma yöntemi, iyonize gaz tanecikleri ile bombardıman

edildikten sonra kaynak malzemedan düşen atomları kullanarak taban malzemesini kaplama işlemidir.



Şekil 19. Sıçratma yöntemi [29]

Sıçratma işlemi günümüzde yüzey aşındırma, yüzey arındırma, ince film kaplama ve yüzeyleri analiz etme işlemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. İleri teknoloji gerektiren birçok optik ve optoelektronik cihaz, güneş pilleri, fotodedektörler, sensörler, kameralar, görüntüleme cihazları bu yöntem kullanılarak üretilmektedir.

Sıçratma işlemi kullanılarak elde edilen fiziksel buhar biriktirme kaplamaları diyot, triyot, manyetik alanda sıçratma ve iyon demeti ile sıçratma olarak gruplandırılmaktadır.



**Magnetik sıçratma işlemi**, hedef malzemenin, su soğutmalı mıknatıs veya elektromıknatıslardan oluşan tutucunun üzerine yerleştirilerek yapılan işlemdir. Mıknatısın bir kutbu kaplama malzemesinin merkez eksenine, ikinci kutbu kaplama malzemesinin kenarlarına yerleştirilir. Mıknatısların bu şekilde düzenlenmesi, elektrik ve magnetik alanların kaplama malzemesinin üzerinde birbirine dik olmasını sağlar.

Magnetik sıçratma yöntemi ile elektronlar yönlendirilerek çarpışmaların daha çok katot yüzeyine yakın yerlerde olması sağlanır. Bu da bölgede iyonizasyonun artmasına ve plazmanın daha yoğun olmasına neden olur. İyonizasyon etkisinin artmasıyla ana sıçratma sistemlerinden daha düşük çalışma basınçlarında plazma oluşturabilen magnetik alanlar meydana getirilebilir. Çalışma basıncının düşürülmesi ile sıçratılan hedef atomlarının gaz fazındaki saçılması daha az olacağından alttaş malzemeye ulaşan tanecik sayısı artar ve böylece birikme hızları nispeten daha yüksek olur. Böylelikle, elektronların etkin kullanılması ile düşük basınçta ve düşük voltajda kaplama yapılabilir.

**Diyot sıçratma işlemi**, biri anot ve diğeri katot olmak üzere iki düzlemsel plakanın karşılıklı yerleştirilmesiyle oluşturulan bir düzenekteki sistemden ibarettir. Sistem yüksek vakum ortamında çalıştırılır. Anoda ve katoda yüksek gerilim uygulanır. Bu gerilimi oluşturmak için doğru akım (DC) güç kaynağı kullanılır. Bu gerilim genellikle kilovolt (kV) seviyesindedir. Gerilim uygulandığı esnada ortama argon gibi

bir soy gaz verilir. Soy gaz, gerilimin etkisi ile iyonize olmaya başlar. İyonize olan gazlar kapalı sistemin içerisinde hareket eder ve katottan moleküller kopararak anoda yani ince film yapılacak yüzeye doğru molekülleri taşır. Bu esnada parlama deşarjı (glow discharge) olayı gözlenir. Bu işlem sırasında katot çok ısınır. Aşırı ısınmayı önlemek için katot soğuk su sistemi ile soğutulur.

**Triyod sıçratma işlemi,** diyot sıçratma işlemi ile benzerdir. Farklı olarak düşük basınçlarda iyonlaşmayı arttırmak ve parlama deşarjını sürdürmek için diyot sıçratma işlemindeki sisteme ek olarak ısıtıcı ve pozitif potansiyelli bir elektrot bulunur. Isıtıcı ve elektrot, gaz iyonizasyon derecesini arttırarak sıçratma verimini yükseltir. Katodun karşısına yerleştirilen birincil anot, plazmanın oluşmasını sağlayan gaz iyonizasyonu potansiyeline yakın bir potansiyele sahiptir. Bu şartlar altında düşük basınç değerlerinde dahi homojen bir plazma elde etme olanağı sağlar.

En çok kullanılan triyot sistemi sıcak katot triyot (hot cathode triode) sistemdir. Sıcak katot termoiyonik emisyon süresince elektron yayar ve bu elektronlar parlama deşarjı sisteminin içine atılır. Bu durumda iyonizasyon etkinliği artar. Böylece parlama deşarjı daha düşük basınçlarda ve daha düşük voltaj uygulanarak oluşur. Bu nedenle triyot sıçratma ile biriktirme hızı (bir kaç yüz nm/dak) diyot sıçratma ile biriktirme hızına göre daha yüksektir. Triyot sıçratma yöntemin temel

dezavantajı reaktif gaz varlığında filamanların ömrünün kısılmasıdır.

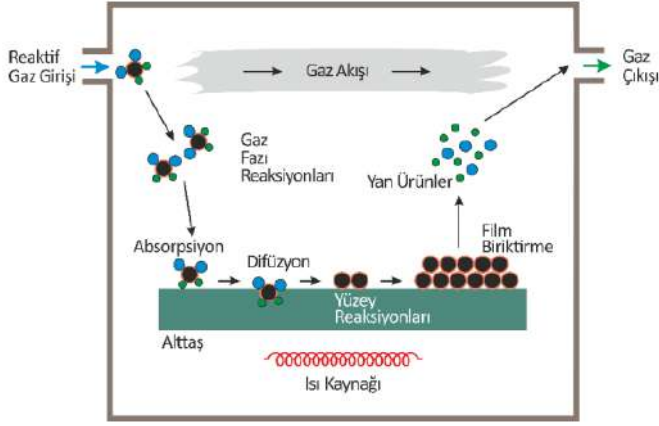
**İyon demeti ile sıçratma işlemi**, temel olarak kaplama yapılacak malzemenin vakum ortamda iyon bombardımanına tutulması ile gerçekleştirilir. Böylece malzemenin yüzeyinden moleküller, iyonlar vasıtasıyla kazınır. Hızlandırılmış yüklü iyonlar, ağır ve hızlı olduklarından yüzey üzerinde bulunan malzemeyi kolaylıkla kazıyabilir. Bu moleküller taban malzemesi üzerine yönlendirilirse yüzey üzerinde bir ince film tabakası oluşturabilir.

### **Kimyasal Buhar Biriktirme**

Yaygın olarak kullanılan bir ince film üretim tekniğidir. Kapalı bir ortamda ısı, elektrik akımı ya da yüksek gerilim ile uyarılmış malzeme üzerinden geçirilen reaktif bir gazın kimyasal reaksiyonu sonucu oluşan buhar kullanılarak gerçekleştirilir. Elde edilen buhar fazındaki malzeme hedeflenen alttaş üzerinde biriktirilir ve ince film oluşum süreci başlar. Çoğunlukla bu işlem, yüksek sıcaklık altında gerçekleştirilir.

Kimyasal buhar biriktirme işlemi, çoğunlukla vakum ortamında gerçekleştirilir. Kaplama işlemi yapılmadan önce, kaplama yapılacak yüzey özel bir işlemle temizlenerek kaplama işlemine hazırlanır.

Kimyasal buhar biriktirme işlemi, magnetron sıçratma ve benzeri gibi teknikler ile üretilmesi zor olan Silikon Dioksit ( $\text{SiO}_2$ ), Tungsten Karbür (WC), Titanyum Nitrür, Alüminyum



**Şekil 20.** Kimyasal buhar biriktirme [29]

Oksit ve Karbon temelli filmlerin üretilmesinde yaygın bir şekilde kullanılır. Bu işlem optik ve optoelektronik malzemeler, nano makineler, mikro işlemciler, yarı iletken cihazlar, fotovoltailer ve güneş pilleri, sensörler, görüntüleme elemanları, havacılık ve otomotiv sektörü gibi değişik alanlarda kullanılabilir.

### **Sıvı Fazda Büyütme**

Sol-jel, kimyasal banyo ve elektrokimyasal yöntem olmak üzere üç grup sıvı fazda büyütme teknikleri bulunmaktadır.

### **Sol-Jel Yöntemi**

Sol-jel yöntemi ince film elde etmek için oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Genel olarak sol-jel sürecinde sistem sıvı fazdan (sol) katı faza (jel) geçiş yapar. Bu yöntemle birçok seramik ve cam malzeme üretmek mümkündür.

Sol-jel işleminin uygulanmasında daldırma işlemi, döndürme (spin) kaplama işlemi ve spreyleme işlemi olmak üzere üç temel teknik kullanılmaktadır.

**Daldırma işlemi**, kısa bir sürede düz olmayan yüzeylerin kaplanmasına imkân tanıyan bir kaplama işlemidir. Bu işlemde, hazırlanan çözelti içerisine kaplanmak istenen malzeme, kontrollü bir hızda daldırılıp yukarı çekilerek çözeltinin bu cismin yüzeyini kaplaması sağlanır. Kaplama işleminin ardından fazla sıvı, malzemenin kenarlarından süzülerek (drenaj) uzaklaşır. Daha sonra sırasıyla buharlaştırma ya da tavlama işlemleri uygulanabilir. Film kalitesinin artırılması adına tavlama işlemi sıklıkla uygulanmaktadır. Tavlamada, özellikle metalik kaplamaların kristal yapısının sağlamlaştırılması amacıyla kaplama yapılan malzeme veya yüzeye dışarıdan ısı uygulanır. Bu işlem çoğunlukla fırın gibi bir ortamda gerçekleştirilir. Bu işlemler sonucunda kaplama yapılmak istenen malzeme veya yüzey üzerinde film tabakası oluşur.

Daldırma işlemi; elektronik, otomotiv, havacılık, inşaat, enerji ve gıda sektörlerinde yaygın olarak rağbet gören bir işlemdir.

**Döndürme (Spin) ile kaplama işlemi**, küçük yüzey alanına sahip malzemelerin belirli bir hızda bir yüzeyinin döndürülmesi prensibine dayanır. Büyük yüzey malzemeler bu işlemle kaplanamazlar çünkü büyük yüzeyli malzemeler, belirli

bir hızın üzerinde döndürüldüklerinde hem malzemenin kendisi hem de uygulayıcılar zarar görebilir.

**Spreyleme ile kaplama işlemi**, sıvıların kaplanacak yüzeyin üzerine hava, azot gazı ya da soy gazlar yardımı ile spreyleneceği esasına dayanır. Spreyleme işlemi, püskürtme işlemi olarak da bilinir. Bu işlem, günlük hayatta kullandığımız spreyleme ve püskürtücüler göz önüne alınarak geliştirilmiştir. Oldukça ekonomik, kullanışlı, kısa sürede biten ve kolay bir tekniktir. Sistem vakum ortamına ihtiyaç duymadığı için ekonomiktir. Püskürtme miktarı doğru ayarlanır ve yeterince sıcak bir yüzeye uygulanırsa kısa bir sürede ince film elde edilebilir. Kullanılan sıvının viskozitesi, püskürtücünün gücü ve uygulama süresi, ince filmin kalitesinin ve kalınlığının belirlenmesinde etkilidir. Film kalitesinin arttırmak için çoğunlukla tavlama işlemi uygulanır.

#### **Kimyasal Banyo Yöntemi (Chemical Bath Deposition)**

Kimyasal banyo yöntemi, daldırma yöntemine çok benzerdir. Daldırma yönteminden farklı olarak kaplama yapılmak istenen malzemenin daldırılan sıvı ile reaksiyona girmesine olanak tanır. Kaplama işlemi sırasında çözelti sürekli karıştırılır böylece çözelti homojen bir yapıda kalarak homojen filmler oluşturulur. pH, çözelti sıcaklığı, çözelti yoğunluğu, çözelti hacmi gibi parametreler ince film kalınlığını ve kalitesini etkiler. Bu yöntemin diğer yöntemlere göre belli başlı avantajları vardır. Düşük sıcaklık ve atmosfer basıncında uygulanabilir olması, pahalı deney ekipmanları gerektirmemesi, ekonomik,

hızlı, kolay ve tehlikesiz uygulamalar içermesi ve ayrıca geniş yüzeylere yarıiletken film kaplamak için uygun olması en belirgin olanlarıdır.

### **Elektrokimyasal (Elektroliz) Yöntem**

Elektrokimyasal (elektroliz) biriktirme yöntemi ile çözeltilerden ince filmlerin kaplanması, malzemenin ya metalik ya da metalik olmayan tabanlar üzerinde toplanması ile gerçekleştirilir. Bu yöntem endüstride en sık kullanılan ve oldukça kaliteli filmler elde etme imkânı veren bir yöntemdir [34].

Kaplama malzemesi çözelti içerisinde bulunan bir yüzeye kolaylıkla kaplanabilir. Bu yöntem büyük boyutlu ve farklı geometrik şekilli malzemelerin homojen ve hızlı bir şekilde yüksek kalitede ince film ile kaplanmasını sağlar. Dışarıdan uygulanan akımın ya da voltajın türüne göre potansiyel kontrollü elektroliz ve akım kontrollü elektroliz olmak üzere iki farklı yolla yapılır.

Elektrokimyasal biriktirme işleminde, üretilen ince filmin kalitesini etkileyen bazı parametreler vardır. Depozisyon potansiyeli, elektrolite katılan maddelerin cinsi ve miktarı, çözelti pH'ı, akım yoğunluğu, elektrolit sıcaklığı, çözelti içine katılan kimyasal katkı maddeleri gibi parametreleri değiştirerek istenilen özelliklere göre ince film üretmek mümkündür.

### **Katı Fazda Büyütme**

Katı fazda büyütme yöntemi, bu bölüme kadar anlatılan işlemlerden daha az tercih edilir. Mekanik aşındırma ve

kristallenme (devitrifikasyon) olmak üzere iki temel gruba ayrılır.

### **Mekanik Aşındırma**

Mekanik aşındırma, birçok plastik deformasyonun sonucu olarak iri tanelerin yapısal bozunması (dekompozisyonu) ile nanomalzemeleri üretmede kullanılır. Mekanik aşındırma, yüksek enerjili değirmenlerdeki toz partiküllerin tekrarlanan birleşme, kırılma ve tekrar birleşme işlemlerini kapsar [28]. Bu işlemlerle saf metallerde, intermetalik bileşenlerde ve karışmaz alaşım sistemlerinde nanokristalli ince film yapılar elde edilir. İntermetalik bileşik, bir metalik bileşik olup kendi bileşimi, kristal yapısı ve özellikleri ile yeni bir faz üreten iki veya daha fazla metalik element içerir. İnce filmler elde edilirken, yeterli öğütme zamanından sonra, herhangi bir malzemede nanometre boyutunda taneler elde edildiği gözlenmiştir. Öğütme zamanı ile tane boyutlarının minimum bir değere doğru azaldığı görülmüştür.

Son yıllarda, kütleli katıların çok sayıda plastik deformasyona kaldığı işlemler sonucu, ultra ince taneli yapıların elde edildiği gözlenmiştir. Tane boyutları, çoğunlukla 3-5 µm boyutlarında olup tam olarak nano boyutta değildir. Bu metotla yapılmış ürünler ile ilgili birçok araştırma çalışmaları bulunmaktadır. Ancak bilimsel olarak bu mekanik öğütme işleminin safsızlık oluşumuna sebep olacağı, boyut dağılımının ve yüzey özelliklerinin kontrol edilemeyeceği konularında endişeler bulunmaktadır. Burada genellikle beklenen, mikron



altı tane boyutta çalışarak, hacimsel yüksek saflıktaki malzemeler üretme olasılıklarını artırmaktır.

### **Kristallenme (Devitrifikasyon)**

Kristallenme, hızlı katılaştırma yöntemi olarak da adlandırılır. Bu amorf alaşımların kontrollü kristalizasyonu, çekirdeklenme oranını artırarak ve büyüme oranını azaltarak, nanoyapılı malzemelerin sentezlenmesinde kullanılır. Bu basit yöntem, nanokristalli malzemelerin magnetik özellikleri üzerinde yapılan çalışmalarda ortak yöntemdir. Magnetik malzemelerin sentezlenmesinde en sık kullanılan ortak yöntem, eriyik kompozisyonu hızlı katılaştırma ile amorf faz elde etmek ve daha düşük sıcaklıklarda camsı fazı kristallendirmektir. Böylece gözenekli, kristalizasyon parametrelerini kontrol ederek farklı tane boyutlu ve büyük miktarlarda malzemeler üretilebilir. Şunu belirtmek gerekir ki, üretilen malzemeler herhangi bir yapay sentezleme işlemi içermezse, ara yüzeyler temizdir ve ürün yoğundur.

### **İnce Film Üretim Tekniklerinin Karşılaştırılması**

Bu bölüme kadar anlatılan ince film üretim tekniklerinde; çözeltinin pH değeri, sıcaklığı ve reaksiyon zamanı, çözücü konsantrasyonu, kullanılan katalizörlerin yapısı ve konsantrasyonu, tavlama sıcaklığı ve süresi, kurutma ve kurutma atmosferi, kullanılan alttaş gibi parametrelerin ince filmin kalitesine, kalınlığına ve üretim maliyeti üzerine etkilerinin olduğu net bir şekilde görülmektedir. Ayrıca, her tekniğin bir diğer tekniğe göre üstünlüklerinin ve eksikliklerinin

olduğu da açıkça görölmektedir. Örneğin, sıvı fazda büyütme tekniklerinde yüksek sıcaklık ve vakum gerekmezken, buhar fazında büyütme tekniklerinde ise vakum ve yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak, buhar fazında büyütme tekniklerinde sıvı fazda büyütme tekniklerine oranla daha kaliteli ve nano boyutta ince filmler elde edilebilmektedir. Katı fazda büyütme teknikleri ise yaygın olarak süperiletken film yapımında kullanılan tekniklerdir. Yaygın olarak kullanılan sol-jel yönteminde çok yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyulmadan kaplama yapılabilmesi bir avantaj iken, çok fazla miktarda kimyasal malzemeye ihtiyaç duyulması ve ince filmlerde oluşan karbon çökelmeleri önemli bir dezavantajdır. Benzer şekilde, kimyasal buhar biriktirme yönteminin en önemli tekniği olan Metal-Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (Metal Organic Chemical Vapor Deposition–MOCVD) yüksek kaliteli epitaksiyel tabakalar, keskin arayüzeyler ve birkaç atom kalınlığında çok tabakalı yapılar üretebilmedeki avantajları bakımından kendini kanıtlamış önemli bir epitaksiyel büyütme tekniği olmasına rağmen, yüksek maliyeti sebebiyle ciddi bir dezavantaj sağlamaktadır. Bu sebeple herhangi bir teknik için diğerlerine göre daha avantajlıdır veya dezavantajlıdır demek doğru bir yaklaşım değildir. Kullanılacak teknik ancak ince film kaplanacak alttaşın cinsine ve boyutuna, kaplama yapılacak sıcaklığa, kaplama malzemesine, mevcut bütçeye ve en önemlisi ince filmin kullanım amacına göre belirlenmektedir.



## **KAYNAKLAR**

[1] Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, William D. Callister, David G. Rethwisch.

[2] Katihal Fiziğine Giriş, Üçüncü Baskı, Prof. Dr. Tahsin Nuri Duru Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi, Ankara 1996.

[3] Physics Of Semiconductor Devices, Yarıiletken Devre Elemanları Fiziği, Jean Pierre Colinge – Cynthia A.Colinge, Çeviri Editörleri: Prof. Dr. Sebahattin Tüzemen – Süleyman Tekmen.

[4] Demir, M., Çukurova Üniversitesi, Doktora Tezi, “Kutuplanmanın Çoklu Yapıların Elektronik Özelliklerine Etkisinin Monte Carlo Yöntemi ile İncelenmesi”, 2011.

[5] Başak, H., İstanbul Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, “Akım Transiyent Spektroskopi Yöntemi ile Yarıiletken Yapıların İncelenmesi”, 2009.

[6] Katihal Fiziği; Prof.Dr.Şakir AYDOĞAN, Nobel Yayıncılık

[7] Amano, H., Sawaki, N., Akasaki, I. And Toyoda, Y., “Metalorganic Vapor Phase Epitaxial Growth Of A High Quality Gan Film Using An Aln Buffer Layer”, Applied Physics Letters, 48 (5), 353-355, 1986.

[8] Simon, M.S.,1981. Physics Of Semiconductor Devices, John Wiley And Sons (Wiley), 560-572 P, New Jersey Natuie, 415(1), 617-620.

[9] Yoshida, S., Misawa, S., Gonda, 1983, Epitaxial Growth of GaN/AlN Heterostructures.

- [10] M. Khan, J. Van Hoven, J. Kuznia, And D. Olson, High Electron Mobility GaN/Algan Heterostructures Grown By Low-Pressure Metalorganic Chemical Vapor Deposition, Applied Physics Letters, 58 (21), 2408–2410, 1991. [4] M. Khan.
- [11] M. Khan, J. Kuznia, A. Bhattarai, And D. Olson, Metal Semiconductor Field Effect Transistor Based On Single Crystal GaN, Applied Physics Letters, 62 (15), 1786–1787, 1993.
- [12] M. Khan, J. N. Kuznia, D. T. Olson, W. Schaff, J. Burm, and M. Shur, Microwave Performance of A 0.25  $\mu\text{m}$  Gate AlGaN/GaN Heterostructure Field Effect Transistor, Applied Physics Letters, 65.
- [13] T.P. Chow, V. Khemka, J. Fedison, N. Ramungul, K. Matocha, Y. Tang, R.J. Gutmann, SiC and GaN Bipolar Power Devices, Solid-State Electronics, 44, 2.
- [14] F. Bernardini, V. Fiorentini, D. Vanderbilt, Spontaneous Polarization and Piezo Electric Constants of III-V Nitrides, Physical Review B, 56, 10024– 10027, 1997.
- [15] Nakamura, S, Fasol, 2000 The Blue Laser Diode: The Complete Story Ridley B.K. 2009, The Physics of III-V Nitrides 2p.
- [16] Amano, H., 1986 Metalorganic Vapor Phase Epitaxial Growth of a High Quality GaN Film.
- [17] Morkoç H., 1994 Large Band Gamp Sic III-V Nitride Semiconductor Devices.

[18] Asif Khan, M.; Kuznia, J. N.; Bhattarai, A. R.; Olson, D. T. (1993). "Metal Semiconductor Field Effect Transistor Based On Single Crystal Gan". Applied Physics Letters 62 (15): 1786.

[19] Wisniewski, P, 2006, Broad-Area High Power CW Operated Ingan Laser Diodes.

[20] Stephen K. O’Leary, 2003, Steady State Electron Transport in the III-V Nitride Semiconductor.

[21] D. Akçayöz, K. Köken, G. Kunt, İ. B. Müldür, S. G. Saykal, Elektron Mikroskopun Tıpta Kullanım Alanları Rs: A Sensitivity Analysis, Journal Of Electronic Materials.

[22] T. H. Gfroerer, Photoluminescence In Analysis Of Surface And Interfaces In Encyclopedia Of Analytical Chemistry, R.A. Meyers (Ed.), John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 9209–9231, 2000.

[23] <https://www.ulusavunma.com/galyum-nitrat-teknolojisi-gan-nedir/> Erişim 7 Haz, 2024.

[24] <https://tr.chargersuppliers.com/info/what-is-gan-technology-for-the-chargers-92180330.html>

[25] <https://www.varta-ag.com/tr/tueketici/ueruen-kategorileri/tasinabilir-guec/gan-technology>

[26] Kızıлтаş, H., Bor Katkılı TiO<sub>2</sub> Nanotüp Fotokatalizörlerinin Üretimi ve Karakterizasyonu, Erzincan University Journal of Science and Technology, 2020.

- [27] Bilgin, V., ZnO Filmlerinin Elektrik, Optik, Yapısal ve Yüzeysel Özellikleri Üzerine Kalay Katkısının Etkisi, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 2003.
- [28] Sönmezoğlu S, Koç M, Akın S., İnce film üretim teknikleri. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi. 2012; 28:389–404.
- [29] Karakuş, E., Koç M. M., Temel İnce Film Üretim Tekniklerine Bir Bakış, *Teknik Not*, Kırklareli Üniversitesi, Journal of Engineering and Science 9-1 (2023) 213-236.
- [30] John, E.M., Physical Vapor Deposition of Thin Films, s. 336, Wiley-Interscience, 2000.
- [31] J. A. Greer (2013), J. Phys. D. Appl. Phys. 47, 034005.
- [32] J. Vyskočil and J. Musil (1990), Surf. Coatings Technol. 43–44, 299.
- [33] Kiyotaka W., Shigeru H., Handbook of Sputter Deposition Technology, Hardcover, 1992.
- [34] G. Oskam, J. G. Long, A. Natarajan, and P. C. Searson, J.(1998), Phys. D. Appl. Phys. 31, 1927.

**ISBN: 978-625-6181-56-4**