



**III-V YARIİLETKEN YAPILARA ÇİNKO VE BENZERİ ATOMLARIN  
DİFÜZYONUNUN GELİŞTİRİLMESİ VE İNCELENMESİ**

**Doğan YILMAZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İLERİ TEKNOLOJİLER ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2016**

Doğan YILMAZ tarafından hazırlanan “III-V YARIİLETKEN YAPILARA ÇİNKO VE BENZERİ ATOMLARIN DİFÜZYONUNUN GELİŞTİRİLMESİ VE İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İleri Teknolojiler Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

İleri Teknolojiler, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

**Başkan :** Prof. Dr. Ekmel ÖZBAY

Elektrik Elektronik Mühendisliği, Bilkent Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

**Üye :** Prof. Dr. Mehmet KASAP

Fizik, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 14 / 01 / 2016

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....  
Prof. Dr. Metin GÜRÜ  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

14/01/2016

Doğan YILMAZ



# III-V YARIİLETKEN YAPILARA ÇİNKO VE BENZERİ ATOMLARIN DİFÜZYONUNUN GELİŞTİRİLMESİ VE İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Doğan YILMAZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2016

## ÖZET

Difüzyon, yarıiletkenlerin içerisindeki katkılama miktarını kontrol etmek ve iletkenlik tipini değiştirmek için önemli süreçlerden biridir. III-V yarıiletkenlerde p-n eklem bölgesi oluşturabilmek için, yüksek p-tipi katkı oluşturabilmesinden dolayı difüzyon süreçleri tercih edilmektedir. III-V bileşik yarıiletkenler için en yaygın p-tipi katkı malzemeleri çinko ve kadmiyumdur. InP yarıiletkeni katkılamak için çinko, kadmiyuma göre bir ya da iki derece daha hızlı difüz etmektedir. Bundan dolayı InP katkılamak için çinko difüzyonunun kontrolü en büyük zorluklardan biridir. InP temelli fotodedektörler için çinko konsantrasyonunun ve p-n eklem konumunun hassas kontrolü oldukça kritiktir. Fakat silisyumla karşılaştırıldığında yüksek difüzyon sıcaklıklarında V. grup elementlerin genellikle yüksek buhar basıncına sahip olmasından dolayı, III-V yarıiletkenlerdeki difüzyon kontrolü çok daha zordur. Çinko difüzyonunun kontrolü ve karakterizasyonu ciddi bir altyapı gerektirmektedir. Bu çalışmada öncelikle çinkonun InP içerisindeki difüzyon mekanizması rapor edilmiştir. Desenli ve yalın InP alıtışlara  $Zn_3P_2$  buharlaştırma ve termal süreç kullanılarak çinko katkılanmıştır. Bu çalışmalarda termal buharlaştırma, magnetron kopartma, termal fırın ve RTA sistemleri gibi temel mikrofabrikasyon metodları kullanılmıştır. Difüzyon profilleri, örneğin difüzyon derinliği ve çinko katkı konsantrasyonu, difüzyon sıcaklığı ve difüzyon süresi açısından ikincil iyon kütle spektrometrisi (SIMS) kullanılarak incelendi. Tabaka konsantrasyonu, direnç ve mobilite değerleri Hall tekniği ile ölçüldü. Ayrıca desenli ve yalın alıtışların difüzyon fabrikasyonları çalışıldı ve karşılaştırıldı.

Bilim Kodu : 202.1.147

Anahtar Kelimeler : Çinko difüzyonu, InP tabanlı fotodedektör, Difüzyon fırını, Hızlı Termal Tavlama sistemi, Difüzyon karakterizasyonu, SIMS

Sayfa Adedi : 60

Danışman : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF ZINC AND SIMILAR DOPANTS  
DIFFUSION TO III-V SEMICONDUCTORS

(M. Sc. Thesis)

Doğan YILMAZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2016

ABSTRACT

Diffusion is one of the key processes to introduce a controlled amount of dopants into semiconductors and to alter the conductivity type. In order to construct the p-n junction of the III-V semiconductors, the diffusion process is the preferred technique because it can form a highly doped p-type. Most common p-type diffusants are zinc and cadmium so technologically crucial for III-V compound semiconductors. Since zinc diffuses one to two orders of magnitude faster than cadmium, one of the biggest challenges associated with the use of zinc as a diffused dopant in InP is the diffusion control. In photodetector based InP fabrication, precise control of the zinc concentration and the position of the p-n junction are quite critically. However, diffusion in III-V compounds semiconductor is more difficult to control compared to diffusion in silicon because the group V element usually has a high vapor pressure at high diffusion temperatures. The high vapor pressure of group V element, which easily causes thermal decomposition of the surface of III-V wafer, is a serious problem. Controlling and characterization of zinc diffusion requires a very serious infrastructure. In this study, we first report on the diffusion mechanism of zinc in InP. Using the evaporated  $Zn_3P_2$  thin film and thermal processing; we doped zinc into both patterned and planar InP substrates. Thermal processing was performed in a thermal furnace and RTA heater systems. In these trials fundamental microfabrication methods were used such as thermal evaporator, magnetron sputtering, thermal furnace and RTA systems. The zinc diffusion profiles, such as the diffusion depth and the zinc dopant concentration, were examined using secondary ion mass spectrometry (SIMS) in terms of diffusion temperature and time. Sheet concentration, resistivity and mobility were measured by Hall effect technique. The fabrication of diffusion in patterned and planar substrates were also studied and compared.

Science Code : 202.1.147

Key Words : Zinc diffusion, InP based photodetector, Thermal Furnace, Rapid Thermal Annealing, Characteristic of Zn doped InP

Page Number : 60

Supervisor : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

## TEŞEKKÜR

Öncelikle tez çalışmam sırasında desteğini benden esirgemeyen Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi müdürü ve tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e, deneysel çalışmalarımın gerçekleştirilmesine olanak tanıyan, yıllardır severek çalıştığım Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (NANOTAM) kurucusu ve direktörü Sayın Prof. Dr. Ekmel ÖZBAY'a teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmanın planlanmasında, uygulanmasında ve sonuca ulaştırılmasında en büyük yönlendiricim olan Erkin ÜLKER'e

Bu tez çalışması için emeği geçen tüm NANOTAM'daki dostlarıma

Her zaman yanımda olan ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili arkadaşlarım Burak TAŞDEMİR'e, Serhat KOZLU'ya, Burak TURHAN'a, Serbay SOLMAZ'a ve Seval DÖNERTAŞ'a

Bugün sahip olduğum her şeye ulaşmamda her zaman yanımda olan babama, anneme ve canım kardeşim Burak'a

Sevgisiyle daima beni motive eden biricik minik eşim Aysun YILMAZ'a sonsuz teşekkür ediyorum.

Bu çalışma 2011K120290 nolu proje ile Kalkınma Bakanlığı tarafından desteklenmiştir.



## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. TEMEL DİFÜZYON TEORİSİ.....	5
2.1. Giriş.....	5
2.2. Difüzyon Modelleri .....	5
2.3. Aktivasyon Enerjisi .....	7
2.4. Difüzyon Eşitlikleri .....	8
2.5. Difüzyon Katsayısı .....	10
2.6. Difüzyon Profilleri .....	11
2.6.1. Sabit yüzey konsantrasyonlu difüzyon profili.....	11
2.6.2. Sabit toplam katkılı difüzyon profili .....	13
2.6.3. Konsantrasyona bağlı difüzyon.....	14
2.7. Difüzyon Yapılmış Katman Direnci .....	15
2.8. III-V Yarıiletkenlere Çinko Difüzyonu.....	15
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	19
3.1. Yalın InP Malzemeye Çinko Difüzyon Fabrikasyonu .....	19

3.1.1. Kesim ve temizlik .....	19
3.1.2. Çinko Fosfit ( $Zn_3P_2$ ) kaplama .....	20
3.1.3. Silikonitrat ( $Si_3N_4$ ) kaplama.....	21
3.1.4. Termal difüzyon .....	22
3.1.5. Asidik temizlik .....	25
3.2. Difüzyon Maske Optimizasyonu.....	26
3.2.1. Termal fırın ile difüzyon maskesi .....	27
3.2.2. Hızlı termal tavlama ile difüzyon maskesi.....	28
3.2.3. Termal buharlaştırma sistemi ile difüzyon maskesi.....	29
3.3. Desenli Çinko Difüzyon Fabrikasyonu.....	30
3.3.1. $Si_3N_4$ kaplama adımı .....	30
3.3.2. $Si_3N_4$ pencere açma adımı .....	30
3.3.3. InP yüzey desenleme .....	31
3.3.4. $Zn_3P_2$ ve $Si_3N_4$ kaplama adımı .....	32
3.3.5. Difüzyon.....	33
4. SONUÇ VE ANALİZLER.....	35
4.1. Atomik Çinko Konsantrasyonu ve Profil.....	35
4.1.1. Sabit süre-Farklı sıcaklık.....	36
4.1.2. Sabit sıcaklık-Farklı süre.....	37
4.1.3. Sabit sıcaklık-Farklı sistem .....	41
4.1.4. Sabit sıcaklık-Farklı süre (RTP).....	41
4.2. Elektriksel Ölçümler .....	43
4.2.1. Hall ölçümü .....	44
4.2.2. Örnek hazırlama .....	46
4.2.3. Çinko aktivasyon yüzdesi .....	52

5. YORUM .....	53
KAYNAKLAR .....	55
ÖZGEÇMİŞ .....	59

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 1.1. InP malzemesinin bazı özellikleri.....	3
Çizelge 2.1. Planer ve mesa tipi fotodedektör karşılaştırması .....	5
Çizelge 3.1. PECVD Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 'ın biriktirme şartları .....	27
Çizelge 4.1. Örneklerin hall ölçümü karşılaştırması .....	49
Çizelge 4.2. F1 ve F2 örnekleri için aşındırma-iletkenlik.....	51
Çizelge 4.3. Çinko elektriksel aktiflik tablosu .....	52

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 1.1. Çinkoblend kristal yapısı .....	2
Şekil 2.1. Atomik difüzyon mekanizmaları .....	7
Şekil 2.2. Difüzyon için aktivasyon enerjisi .....	8
Şekil 2.3. Birim hacim boyunca yayılan maddenin akışı.....	9
Şekil 2.4. Bazı malzemeler için aktivasyon enerjisi .....	10
Şekil 2.5. Sabit yüzey konsantrasyon difüzyonu .....	12
Şekil 2.6. Hata fonksiyonu grafiği .....	12
Şekil 2.7. Sabit toplam katkılı difüzyon profili.....	14
Şekil 2.8. Dışsal difüzyon için difüzyon sabiti-konsantrasyon grafiği .....	15
Şekil 2.9. Frank-Turnbull ve Kick-out mekanizması.....	16
Şekil 3.1. InP alttaş kesiti ve temizlik adımı.....	20
Şekil 3.2. Zn <sub>3</sub> P <sub>2</sub> kaplı alttaş kesiti ve kaplama sistemi .....	21
Şekil 3.3. Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> kaplı örnek kesiti ve kaplama sonrası örnekler.....	21
Şekil 3.4. Difüzyon sonrası örnek kesiti ve difüzyon fırını .....	22
Şekil 3.5. Bilgisayar programlı fırın kontrolü.....	23
Şekil 3.6. Hızlı termal tavlama (RTA) Sistemi.....	24
Şekil 3.7. NVTS 400 sistemi.....	24
Şekil 3.8. NVTS 400 sistemi sıcaklık-zaman grafiği.....	25
Şekil 3.9. Temizlik sonrası örnek kesiti ve temizlik adımı.....	25
Şekil 3.10. Üretim süreci .....	26
Şekil 3.11. Difüzyon maskesinin ısıtıl işlem öncesi ve sonrası .....	27
Şekil 3.12. Termal fırın ile ısıtıl işlem sonrası difüzyon maskesi.....	28

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.13. RTA ile ısıtıl işlem sonrası difüzyon maskesi-1 .....	28
Şekil 3.14. RTA ile ısıtıl işlem sonrası difüzyon maskesi-2 .....	29
Şekil 3.15. PVD ile ısıtıl işlem sonrası difüzyon maskeleri.....	29
Şekil 3.16. Örnek kesiti ve Sentech PECVD sistemi.....	30
Şekil 3.17. İlgili adım kesiti ve Samco ICP-RIE sistemi.....	31
Şekil 3.18. İlgili adım kesiti ve Sentech ICP-RIE sistemi .....	32
Şekil 3.19. Örnek yüzeyine $Zn_3P_2$ sonrasında $Si_3N_4$ kaplanması.....	32
Şekil 3.20. Temizlik sonrası örnek .....	33
Şekil 4.1. SIMS çalışma prensibi.....	35
Şekil 4.2. Farklı sıcaklıklar için SIMS analizi .....	37
Şekil 4.3. Farklı süreler için SIMS analizi .....	38
Şekil 4.4. 455 °C için $d^2-t$ grafiği .....	38
Şekil 4.5. Difüzyon katsayısı- $1000/T$ grafiği .....	40
Şekil 4.6. RTA ile Termal fırın karşılaştırılması .....	41
Şekil 4.7. RTA farklı süre-SIMS grafiği 1 .....	42
Şekil 4.8. RTA farklı süre-SIMS grafiği 2.....	42
Şekil 4.9. 450 °C için $d^2-t$ grafiği.....	43
Şekil 4.10. Hall ölçümü .....	45
Şekil 4.11. Van Der Pauw metodu.....	46
Şekil 4.12. Hall ölçümü için örnek şekilleri .....	47
Şekil 4.13. Hall ölçümü için hazırlanan örnek.....	47
Şekil 4.14. Hall ölçüm sistemi .....	48
Şekil 4.15. Hall sistemi örnek tutucu .....	48
Şekil 4.16. Bilgisayar yardımıyla alınan ölçüm.....	49

Şekil 4.17. Tabaka konsantrasyon-derinlik grafiği (450 °C_8dk.) .....	50
Şekil 4.18. Tabaka konsantrasyon-derinlik grafiği (450 °C_11dk.) .....	51

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
Å	Angstrom
As	Arsenik
cm	Santimetre
Cd	Kadmiyum
D	Difüzyon katsayısı
Ga	Galyum
Ea	Aktivasyon enerjisi
Eg	Yasak enerji aralığı
Ev	Valans bandı
Ec	İletim bandı
In	İndiyum
n	Birim hacimdeki elektron sayısı
N <sub>2</sub>	Azot
p	Birim hacimdeki deşik sayısı
P	Fosfor
n <sub>i</sub>	Saf taşıyıcı yoğunluğu
nm	Nanometre
J	Akım yoğunluğu
k	Boltzmann sabiti
Si	Silisyum
T	Mutlak sıcaklık
σ	Elektriksel iletkenlik
ρ	Elektriksel özdirenc
V <sub>H</sub>	Hall Gerilimi
Zn	Çinko
μ	Mobilite
Ω	Ohm



**Kısaltmalar****Açıklamalar**

AlGaN	Alüminyum galyum nitrit
APD	Çığ fotodedektör
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
GaAs	Galyum Arsenik
HF	Hidroflorik asid
ICP	İyon Eşlemeli Plazma
InP	İndiyum Fosfat
MBE	Moleküler Demet Epitaksi
MOCVD	Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme
NH <sub>3</sub>	Amonyak
PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme
PECVD	Plazma Güçlendirmeli Kimyasal Buhar Biriktirme
RIE	Reaktif İyon Aşındırma
RTA	Hızlı Termal Tavlama
SIMS	İkincil İyon Kütle Spektroskopisi
SiH <sub>4</sub>	Silan
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Silikonnitrat
SOD	Spin on Dopant
Zn <sub>3</sub> P <sub>2</sub>	Çinkofosfit



## 1. GİRİŞ

Yarıiletken malzemeler 1940 yılının sonlarına doğru ortaya çıkmıştır. Bu tarihten sonra günümüze kadar yarıiletken malzemeler üzerinde birçok çalışma yapılmış ve buna paralel olarak yarıiletken teknolojisinde büyük gelişmeler olmuştur. Yapısında yarıiletken malzeme kullanılan elektronik devre elemanlarına fotovolttaik pil, fotodedektör, diyot ve transistör örnek verilebilir [1].

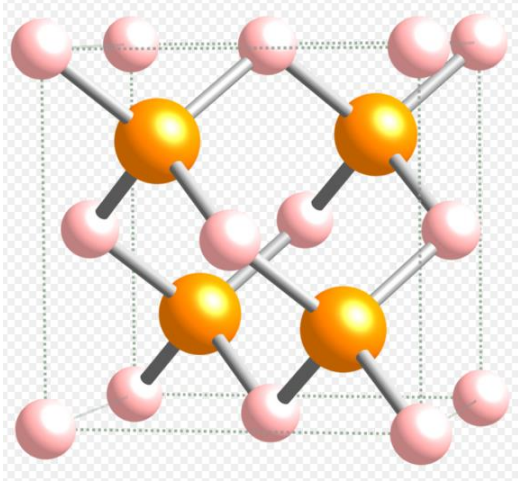
Yarıiletken madde, elektrik iletkenliği bakımından, iletken ile yalıtkan arasında kalan maddelerdir [2]. Mutlak sıcaklıkta yalıtkan olan bu maddeler ısı, ışık, manyetik etki veya elektriksel gerilim gibi dış etkiler uygulandığında bir miktar değerlik elektronlarını serbest hale geçirerek iletken duruma gelirler. Uygulanan bu dış etki veya etkiler ortadan kaldırıldığında ise yalıtkan duruma geri dönerler. Bu özellik elektronik alanında yoğun olarak kullanılmalarını sağlamıştır [3].

Yarıiletkenlerin değerlik yörüngelerinde dört elektron bulunur. Bu yüzden yarı iletkenler iletkenlerle yalıtkanlar arasında yer almaktadır. Elektronik elemanlarda en yaygın olarak kullanılan yarı iletkenler germanyum ve silisyum elementleridir. Yarı iletken malzemeler; iletkenlerden  $10^{-10}$  defa az iletken, yalıtkanlara göre  $10^{14}$  defa daha fazla iletkenlerdir [4].

Yarıiletken elektronik devre elemanlarında daha çok silisyum (Si) kullanılır. Silisyum ve germanyum devre elemanı üretiminde saf olarak kullanılmaz. Bu maddelere katkı katılarak değerlik bandı enerji seviyesi yukarıya veya iletkenlik bandı enerji seviyesi aşağıya çekilir. Değerlik bandının yukarı çekildiği yarıiletkenlere P tipi yarı iletken, iletkenlik bandının aşağıya çekildiği yarıiletkenlere ise N tipi yarı iletken denir. P tipi yarıiletkende yüklü boşluk derişimi, N tipi yarıiletkende ise elektron derişimi görel olarak daha yüksektir [5, 6].

Yarıiletkenler, ayrıca ikiden fazla elementin birleşmesi ile elde edilebilir. Bu yarıiletkenlere “bileşik yarıiletken” denir. İki element içeren yarıiletkenlerin kimyasal formülü AB grubu yarıiletkenleri diye gösterilir. Eğer A elementine üç valans elektronu ve B elementine de beş valans elektronu bağlı ise bu ikili bileşik yarıiletken grubuna “III-V grubu yarıiletkenler” denir. GaAs, InP ve GaP örnek olarak verilebilir. Üçlü ve dörtlü yarıiletkenlerde mevcuttur. AlGaN, InGaAs, InGaAsP yarıiletkenleri bunlara örnek gösterilebilir [1, 4].

III-V yarıiletkenler, III. Grup elementler (Galyum, İndiyum, Alüminyum) ile V. Grup atomlardan (Arsenik, Fosfor, Antimon) oluşan bileşiklerdir. Her III grup atomunun en yakın komşuları 4 tane V. grup atomudur ve çinkoblend (zincblende) kristal yapısı şekilde temsil edilir (Şekil 1.1). Burada iki atom türü iç içe yüzey merkezli kübik kafes oluştururlar [7].



Şekil 1.1. Çinkoblend kristal yapısı [8]

Komşu atomları arasındaki mesafe grubun farklı üyeleri için yaklaşık yüzde 20 oranında değişmektedir. GaP için 0,236 nm'den InSb için 0,280 nm'dir. III-V gruplarının en önemli özelliklerinden biri enerji band aralığıdır. III-V ler için enerji band aralığı 0,2 eV (InSb) den 2,5 eV (AlP) arasında değişmektedir.

Yüksek elektron mobilitesi sebebiyle bu malzemelere olan ilgi 1950 lerde başlamıştır. Transistör uygulamaları için germanyum ve silikona alternatif olarak GaAs malzemesi düşünülmüştür. Aynı zamanlarda GaAs p-n eklem bölgesinin ileri beslemede ışık verdiği rapor edilmiş ve böylece ilk ışık yayan diyod elde edilmiştir.

III-V'lerin çoğu büyük hacim (bulk) kristal olarak üretilir. Fakat bunlardan GaAs ve InP ticari olarak kullanılmaktadır. Bu bulk kristallerin üretimi için iki önemli teknik vardır. Bunlar Bridgeman ve Czochralski teknikleridir. GaAs ve InP genelde  $10^7$  ohmcm öz direnç değerlerine elde edilir. Yarı-yalıtkan malzemelerde kullanılan bu altaşlar III-V'lerin en önemli avantajı olarak görülmektedir [2, 9].

Telekomünikasyon sistemlerinde, fiberlerin iki tane düşük kayıp penceresi vardır. Bu pencereler 1,31 ve 1,55  $\mu\text{m}$  dalgalı boylarındaki pencerelerdir. Bu dalgalı boylarının algılanabilmesi için son yıllarda InP tabanlı malzemeler kullanılmaktadır. Bu III-V yarıiletkenler yüksek hızlı ve yüksek duyarlılıklı p-i-n ve APD dedektörlerin üretiminde kullanılmaktadır. Son yıllarda 1,55  $\mu\text{m}$  dalgalı boyu etrafında çalışan ve bu dalgalı boylarında ışığı soğurabilen ve yüksek kalitede büyütülmesi mümkün olduğu için InGaAs temelli fotodedektör çok büyük bir öneme sahip olmuşlardır. Genellikle epitaksiyel büyütme metodu olarak “moleküler ışın demeti (MBE)” seçilir ve InGaAs örgüsüne uygun olan InP yarı-yalıtkan alttaşı üzerine dedektör katmanları büyütülür. Uygun epitaksiyel yapılar sayesinde ışık sadece aktif katman olan InGaAs'ta soğurur. Sonuç olarak yüksek kuantum verimi yanında yüksek hız elde edilir [10-12].

Çizelge 1.1. InP malzemesinin bazı özellikleri [11]

Kimyasal Formül	InP
Yoğunluk	4,81 g/cm <sup>3</sup> , katı
Band aralığı	1,344 eV (300 °K)
Elektron mobility	5400 cm <sup>2</sup> /Vs (300 °K)
Kristal yapısı	ÇinkoBlende
Örgü sabiti	$a = 5,8687 \text{ \AA}$

Optoelektronik aygıt fabrikasyonunda p-n eklem bölgesi oluşturmak için InP tabanlı birleşik malzemelere çinko atomu difüzyonu oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yüksek katkılama seviyesi neticesinde fabrikasyonlarda difüzyon tercih edilmektedir. InP malzemesi için genellikle kullanılan katkı malzemeleri Zn ve Cd atomlarıdır. Çinko atomları Kadmiyum atomlarına göre iki derece daha hızlı difüz etmektedir. Bu ise hem avantaj hem de bazı dezavantajlar getirmektedir. Difüzyonun kontrol edilebilmesi için bir zorluk fakat yüksek katkı miktarı sayesinde avantaj sağlamaktadır [13].

Bu çalışmada temel amaç; difüzyon derinliği, katkı konsantrasyonu kontrol edilebilen, uniform ve tekrar edilebilir bir şekilde çinko atomlarının InP tabanlı yapılara difüzyonun gerçekleşmesi ve bu difüzyonun karakterize edilmesidir. Bu amaç doğrultusunda ilk olarak difüzyon teorisi ve modelleri üzerine çalışıldı. Difüzyon üretim adımları üzerine araştırma

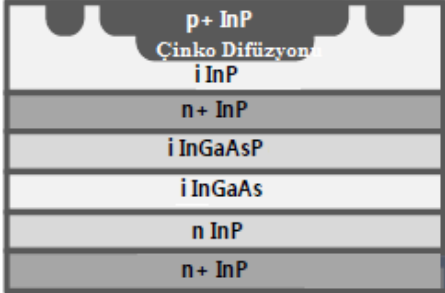
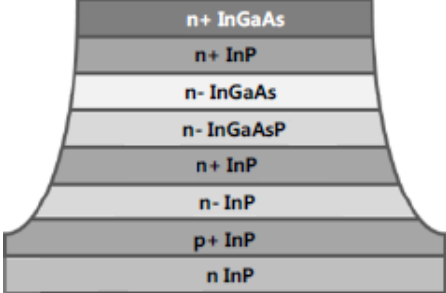
geliştirme çalışmaları yapıp, InP malzemesine desenli ve desensiz alttaşa çinko malzemesinin difüzyonu üzerine çalışıldı. Bu denemelerde termal buharlaştırma, magnetron koptma ve termal fırın gibi temel mikrofabrikasyon yöntemleri kullanılmıştır. 2. Adımda, difüzyon sıcaklığının difüzyon derinliğine bağılılığı araştırılmıştır. Difüzyon karakterizasyonu için İkincil İyon Kütle Spektrometresi (SIMS) analiz ve Hall yöntemi kullanılmıştır.

## 2. TEMEL DİFÜZYON TEORİSİ

### 2.1. Giriş

InP alttaş üzerine epitaksiyel katmanlar büyütülürken iki farklı yapı elde edilebilir. Bunlardan birincisi en üst katmandaki InP malzeme katkısız olabilir ya da epitaksiyel büyütme sırasında en üst katman katkılanabilir. Dedektör performansı olarak düşük karanlık akım, yüksek kuantum verimi ve yüksek hız elde edilmesi isteniyorsa tüm yüzeyi p tipi katkılamak yerine sadece yüzeydeki istenilen bölgelerin p tipi katkılanması büyük önem taşır [14]. Çizelge 2.1'de planer ve mesa tipi InGaAs/InP çığ fotodedektör karşılaşması görülmektedir.

Çizelge 2.1. Planer ve mesa tipi fotodedektör karşılaştırması

	Planer tipi	Mesa tipi
Üretim sonrası epitaksiyel yapı		
Avantajlar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Düşük karanlık akım</li> <li>• Büyük aktif bölge</li> <li>• Yüksek kuantum verimi</li> <li>• Yüksek hızlı tepkisellik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Düşük çaprazkarışma (crosstalk)</li> <li>• Basit Fabrikasyon</li> </ul>
Dezavantaj	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difüzyon farklılıkları</li> <li>• Pahalı altyapı</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mesa aşındırma kusurları</li> </ul>

Difüzyon, (yayınım) bir malzeme içinde atomların hareketidir. Atomlar, konsantrasyon farkını yok etmek ve homojen bir kompozisyon oluşturmak için düzgün bir şekilde hareket ederler [7, 15].

Difüzyon yarıiletken kristallerin katkılanmasında çok önemli bir işlemdir ve atomların difüzyonu açıklamaya çalışan birçok mekanizma öne sürülmüştür [10].

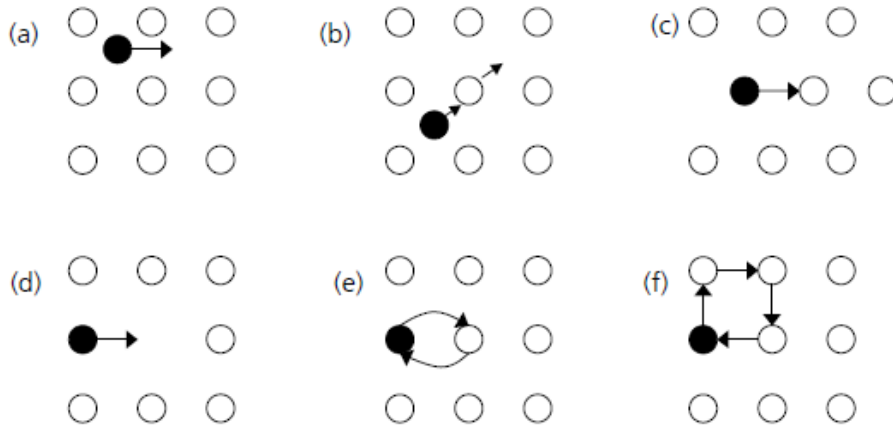
## 2.2. Difüzyon Modelleri

Temel olarak iki farklı atomik difüzyon modeli vardır. Bunlar yer alan (substitutional) difüzyon ve arayer (interstitial) difüzyon modelleridir. Arayer difüzyon modeli; arayer (interstitial), arayeratom (interstitialcy, kick-out) ve Crowdion mekanizmaları olmak üzere üç şekilde modellenebilir. Yer alan difüzyon ise boşluk (vacancy), değişimli (exchange) ve halka (ring) mekanizmaları şeklinde modellenebilir. Şekil 2.1'de atomik difüzyon mekanizmaları arayer (a-c) ve yer alan (d-f) gösterilmektedir.

Arayer mekanizması durumunda atomlar buldukları örgü bölgesinden komşu örgüye atlayarak ilerler (Şekil 2.1.a). Katkı atomu kristal yapıdaki atomlardan küçükse genelde bu şekilde ilerler ve mekanizmanın gerçekleşmesi için boşluklara gerek yoktur. Eğer arayer katkı atomu örgü atomunu yerinden çıkartıyorsa böyle mekanizmalara arayer kovma (kick-out) denir. Yerinden çıkarılan örgü atomu artık yeni bir arayer atomuna dönüşmüş olur (Şekil 2.1.b). Crowdion mekanizması arayer difüzyon mekanizması ile alakalı bir modeldir. Arayer atomu bir örgü bölgesinden diğer iki örgü bölgesinin tam arasına gelmesiyle gerçekleşir. Bundan dolayı örgü atomları yer değiştirmiş olur ve bu yarım pozisyon kaymaları onları arayer atomları yapar (Şekil 2.1.c).

Boşluk difüzyonu, atom yanındaki örgüdeki boşluğu doldurma için kendi örgüsündeki terkeder. Bu nedenle orjinal kafes yerinde yeni bir boşluk oluşur (Şekil 2.1.d). İki komşu atom direk olarak yer değiştirdiği zaman buna değişimli mekanizma denir (Şekil 3.1.e). Yer alan atomlar örgü atomlarıyla dolaylı olarak yer değiştirirse bu mekanizmaya halka mekanizması denir. Bu mekanizmada iki ya da daha fazla atom eşzamanlı olarak yer değiştirilmesiyle gerçekleşir. (Şekil 2.1.f) [16, 17].



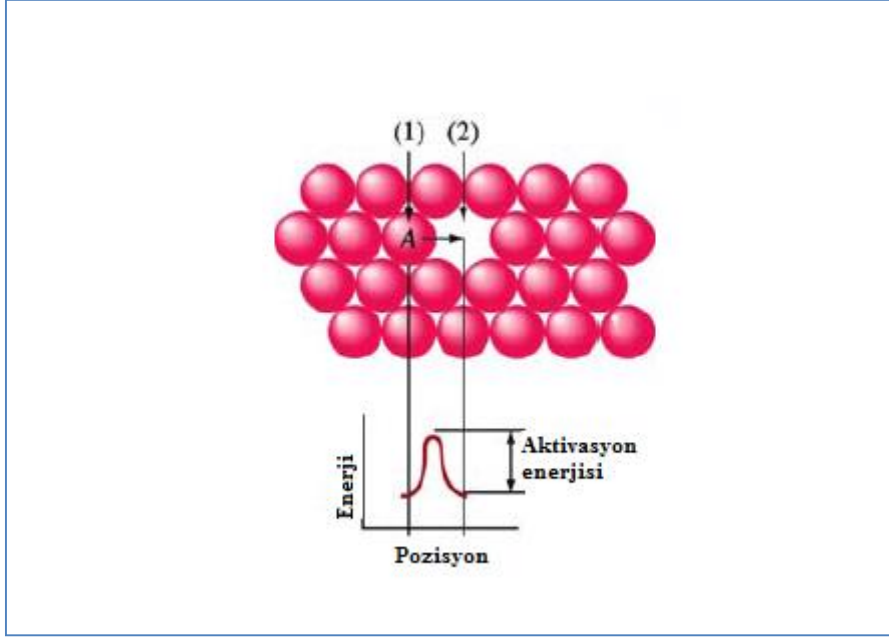


Şekil 2.1. Atomik difüzyon mekanizmaları (a)Arayer, (b) Kick out, (c) Crowdion, (d) boşluk, (e) değişim, (f) halka mekanizmaları [7, 17]

### 2.3. Aktivasyon Enerjisi

Difüz eden bir atom, yeni yerine ulaşmak için çevre atomlarını sıkıştırarak geçmek zorundadır. Bunun gerçekleşebilmesi için, atomların yeni konumlarına geçmesini zorlayacak enerji sağlanmalıdır. Atom, orjinal olarak nispeten kararlı konumda ve düşük enerjili haldedir. Yeni bir bölgeye hareket etmek için, enerji engelini aşmak zorundadır. Bu enerji ‘aktivasyon enerjisi’ dir ve  $E_a$  ile gösterilmiştir. Söz konusu bu enerji sınırını aşmak için, atom ısıtılır [7].

Normal olarak bir arayer atomunun, çevre atomları geçmek için sıkıştırması daha az enerji gerektirir. Bunun sonucu olarak, arayer difüzyonu için aktivasyon enerjileri boşluk difüzyonu için olandan daha azdır. Düşük bir aktivasyon enerjisi daha kolay difüzyonu gösterir.



Şekil 2.2. Difüzyon için aktivasyon enerjisi

#### 2.4. Difüzyon Eşitlikleri

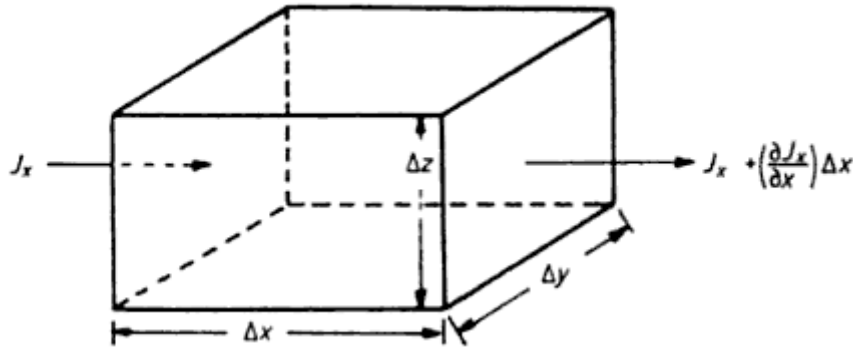
Bir yarıiletkenin içinde atomların difüzyon hızı, birim zamanda, birim düzlem alanı boyunca geçen atom sayısı olarak tanımlanan akı 'J' ile ölçülebilir. Birinci Fick kanunu, net atom akısını açıklar. x yönündeki Fick kanunu;

$$J_x = -D \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} \quad (2.1)$$

Burada  $J_x$ ; x-yönündeki difüzyon akısı (atom/m<sup>2</sup>s) ve C konsantrasyon gradyantıdır (atom/m<sup>3</sup>). Bu gradyant, x yönünün ve t zamanının bir fonksiyonudur. D ise difüzyon katsayısıdır (m<sup>2</sup>/s). D değeri, molekülün bulunduğu ortamda birim zamanda ne kadarlık bir alanı geçebildiğini veya ortamdaki uzaklaşma yeteneğini gösterir. Negatif işaretin anlamı ise molekül hareketinin daha az yoğun bölgeye doğru olduğunu, yoğun bölgeden uzaklaştıkça derişimin azaldığını ve bu nedenle akı değerinin her zaman pozitif olacağını ifade eder [5].

Birinci Fick kanunu kararlı durum difüzyonu için geçerlidir. Yani konsantrasyon profilinin zamanla değişmez. Fakat yarıiletken difüzyon olayında atomların kristal içerisindeki hareketi bu kadar basit değildir ve Fick yasasına uygun olmayan (non-Fickian) şekilde difüzyon meydana gelir. İkinci yasa eşitlik 2.1'in devam eden koşulları için türetilmiştir.

İkinci kanununa göre; konsantrasyon ve akı hem zaman, hem de mesafeye bağlıdır. Difüzyon bölgesinde, zamanla konsantrasyon değişim hızı, katedilen mesafedeki derişim farkının değişim hızı ile orantılıdır.



Şekil 2.3. Birim hacim boyunca yayılan maddenin akışı [9]

X yönündeki akış nedeniyle birikme hızı;

$$\Delta y \Delta z \left[ J_x - J_x + \left( \frac{\partial J_x}{\partial x} \right) \Delta x \right] = - \frac{\partial J_x}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.2)$$

3 yöndeki akış nedeniyle birikme hızı;

$$-\Delta x \Delta y \Delta z \left( \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} + \frac{\partial J_z}{\partial z} \right) = \frac{\partial c}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.3)$$

Bu denklemin sağ tarafındaki  $\Delta x \Delta y \Delta z$  birim hacimdir. Buradan;

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} + \frac{\partial J_z}{\partial z} = 0 \quad (2.4)$$

Fick'in 1. Yasasındaki eşitlikte yerine koyulursa,

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (2.5)$$

Eğer D sabit ise,

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \nabla^2 C \quad (2.6)$$

Birçok pratik durumda, sadece bir boyutta difüzyon dikkate alınması gerekmektedir. Eğer sadece x yönü boyunca gradient varsa 2.5 ve 2.6 eşitlikleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (2.7)$$

ve

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.8)$$

Bu ikinci Fick yasasının çözümü belirli bir durum için, sınır kurallarına bağlıdır [13]. Konsantrasyonun ikinci yasadın çözümü içsel (intrinsic) ve dışsal (extrinsic) difüzyon için farklı düşünülmelidir. Bunun sebebi bu iki difüzyon için difüzyon katsayısının farklı özellikte olmasıdır. Eğer katkı atomu konsantrasyonu içsel taşıyıcı konsantrasyonundan az ise difüzyon, Fick eşitliklerinin sabit difüzyon katsayısı ile tanımlanır. Katkı atomu konsantrasyonu, içsel taşıyıcı konsantrasyonundan fazla ise difüzyon katsayısı sabit olmaz [7, 9, 16-18].

## 2.5. Difüzyon Katsayısı:

Difüzyon katsayısı aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) \quad (2.9)$$

Burada  $E_a$  aktivasyon enerjisidir (eV),  $k$  Boltzmann sabiti (eV/K),  $T$  mutlak sıcaklık ( $^{\circ}\text{K}$ ) ve  $D_0$  belirli difüzyon sistemi için bir sabittir ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ). Aynı zamanda atomik yerdeğiştirme frekansı ve örgü titreşim frekansı ile ilgilidir (tipik olarak  $10^{13}$  Hz).

Katkı Atomu	Malzeme	$D_0(\text{m}^2/\text{s})$	Aktivasyon enerjisi $Q_a$		Deneysel veriler	
			$\text{kJ/mol}$	$\text{eV/atom}$	$T(^{\circ}\text{C})$	$D(\text{m}^2/\text{s})$
Fe	$\alpha$ -Fe (BCC)	$2.8 \times 10^{-4}$	251	2.60	500	$3.0 \times 10^{-21}$
					900	$1.8 \times 10^{-15}$
Fe	$\gamma$ -Fe (FCC)	$5.0 \times 10^{-5}$	284	2.94	900	$1.1 \times 10^{-17}$
					1100	$7.8 \times 10^{-16}$
C	$\alpha$ -Fe	$6.2 \times 10^{-7}$	80	0.83	500	$2.4 \times 10^{-12}$
					900	$1.7 \times 10^{-10}$
C	$\gamma$ -Fe	$2.3 \times 10^{-5}$	148	1.53	900	$5.9 \times 10^{-12}$
					1100	$5.3 \times 10^{-11}$
Cu	Cu	$7.8 \times 10^{-5}$	211	2.19	500	$4.2 \times 10^{-19}$
Zn	Cu	$2.4 \times 10^{-5}$	189	1.96	500	$4.0 \times 10^{-18}$
Al	Al	$2.3 \times 10^{-4}$	144	1.49	500	$4.2 \times 10^{-14}$
Cu	Al	$6.5 \times 10^{-5}$	136	1.41	500	$4.1 \times 10^{-14}$
Mg	Al	$1.2 \times 10^{-4}$	131	1.35	500	$1.9 \times 10^{-15}$
Cu	Ni	$2.7 \times 10^{-5}$	256	2.65	500	$1.3 \times 10^{-22}$

Şekil 2.4. Bazı malzemeler için aktivasyon enerjisi [14]

Bir malzemenin sıcaklığı arttığı zaman, difüzyon katsayısı ve atomların akısı da artar. Yüksek sıcaklıklarda atomların difüzyonu için sağlanan enerji, atomların aktivasyon enerji engelini aşmasını ve daha kolaylıkla yeni örgü yerlerine hareket etmesini sağlar.

## 2.6. Difüzyon Profilleri

Difüzyon profilleri sabit yüzey konsantrasyonlu difüzyon profili, sabit toplam katkılı difüzyon profili ve konsantrasyona bağlı difüzyon olmak üzere 3 bölümde incelenmektedir.

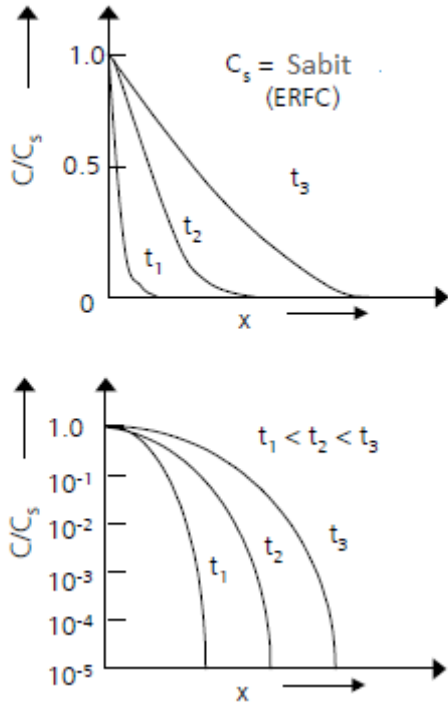
### 2.6.1. Sabit yüzey konsantrasyonlu difüzyon profili:

Bu durum katkısız yarıiletken yonganın (wafer) difüzyon sırasında sabit konsantrasyon kaynağı tarafından pozlandırıldığında (expose) meydana gelir. Örneğin bu metod katkı atomlarının yarıiletken yüzeyine buhar olarak taşınması ve yarıiletken hacme (bulk) difüz etmesinde kullanılır [5].

Sabit yüzey konsantrasyonu durumu için başlangıç şartları  $t = 0$  için  $C(x, 0) = 0$  ve sınır durumu için  $C(0, t) = C_s$  ve  $C(\infty, t) = 0$  dir. Bu şartların ikinci fick yasasına göre çözümü;

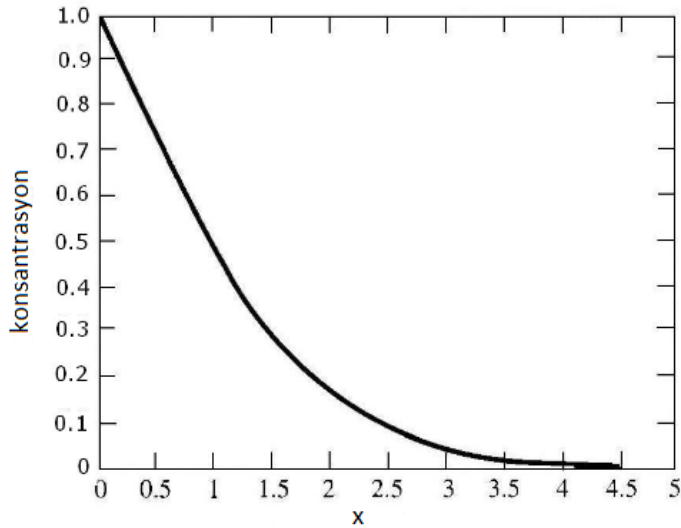
$$C(x, t) = C_s \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (2.10)$$

Burada  $C_s$  yüzey konsantrasyonu,  $D$  difüzyon sabiti,  $x$  mesafe,  $t$  difüzyon zamanı ve  $\operatorname{erfc}$  ise tamamlayıcı hata fonksiyonudur. Konsantrasyon profili normalize edilmiş hata fonksiyonu olarak değişik zamanlar için hem doğrusal hem de yarılogaritmik ölçekte şekil 2.5'de gösterilmiştir [19].



Şekil 2.5. Sabit yüzey konsantrasyon difüzyonu [5]

Eşitlikteki tamamlayıcı hata fonksiyonunun çizimi Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Hata fonksiyonu grafiği

Ayrıca  $erfc(x) = 1 - erf(x)$  olduğundan, eşitlik 2.11 aşağıdaki gibi de gösterilebilir.

$$C(x, t) = C_s \left[ 1 - erf\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \right] \quad (2.11)$$

Birim alandaki toplam katkı miktarı bulmak için;

$$Q_t = \int_0^{\infty} C_s \left[ 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \right] dx = \frac{2C_s}{\sqrt{\pi}} \sqrt{Dt} \quad (2.12)$$

### 2.6.2. Sabit toplam katkılı difüzyon profili:

Katkılı ince film yarıiletken yüzeyinde sabit veya toplam katkı atomlarının sayısı birim alan başına  $Q_t$  sabit olduğunda bu yöntem kullanılır. Burada katkı atomları sadece yarıiletkenin içine difüz olur ve tüm katkı atomları yarıiletkenin içinde kalır [18]. Fick'in ikinci yasasını burdaki başlangıç ve sınır koşullarında çözümlersek;

Başlangıç şartı  $C(x, 0) = 0$  ve sınır şartları  $\int_0^{\infty} C(x, t) dx = Q_t$  ve  $C(\infty, t) = 0$

Difüzyon eşitliğinin çözümü;

$$C(x, t) = \frac{Q_t}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \quad (2.13)$$

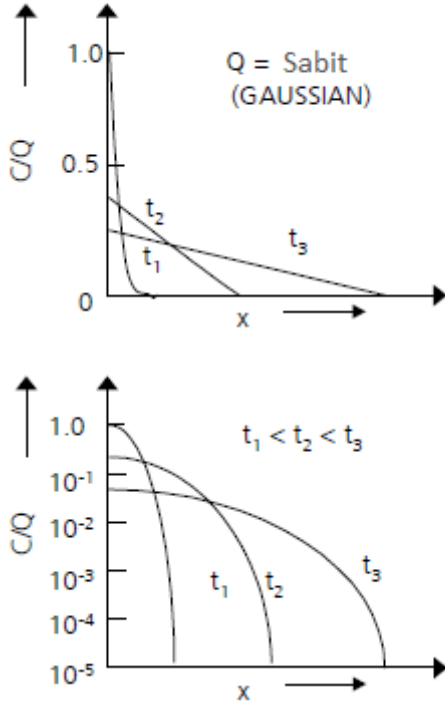
Bu denklem sık sık Gauss dağılımı olarak adlandırılır.

Eğer denklemde  $x = 0$  olursa denklem 2.13 yüzey konsantrasyonu  $C_s$ 'e eşittir.

$$C_s = C(0, t) = \frac{Q_t}{\sqrt{\pi Dt}} \quad (2.14)$$

Eşitlik 2.13 ve 2.14'i birleştirirsek;

$$C(x, t) = C_s \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \quad (2.15)$$



Şekil 2.7. Sabit toplam katkılı difüzyon profili [5]

### 2.6.3. Konsantrasyona bağlı difüzyon

Yüksek konsantrasyonlarda, difüzyon şartları sabit yüzey konsantrasyonu olduğu zaman katkı profili sabit difüzyon katsayılı difüzyonlarla aynı olmaz. Konsantrasyona bağlı difüzyon katsayısı aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$D = D(c) \quad (2.16)$$

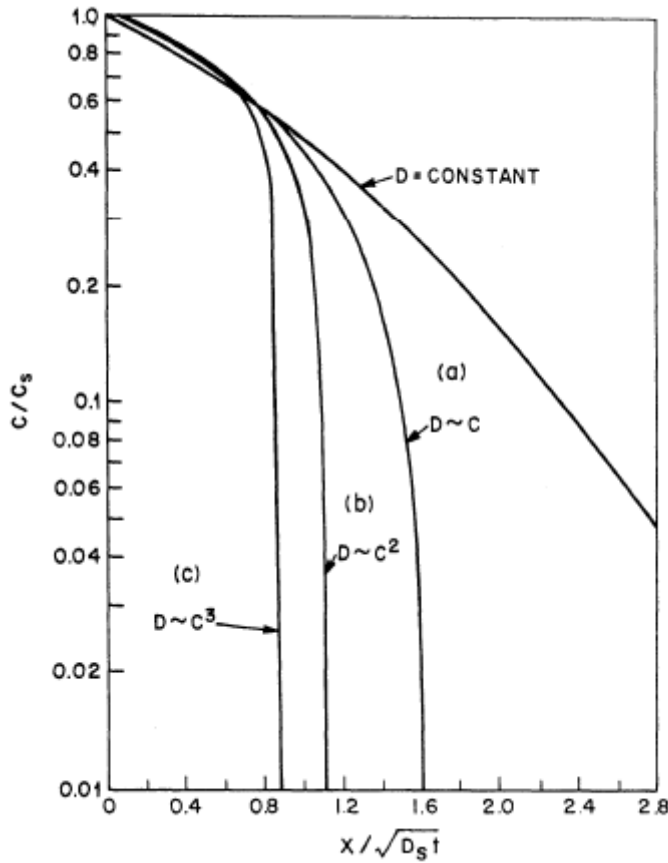
$$D = D_s \left( \frac{c}{c_s} \right)^r \quad (2.17)$$

$D_s$  yüzeydeki difüzyon katsayısı,  $C_s$  yüzey konsantrasyonu ve  $\gamma$  pozitif tamsayıdır.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_s \left\{ \frac{c}{c_s} \right\}^\gamma \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (2.18)$$

Eşitlik 2.18 nümerik çözülmektedir ve sabit yüzey konsantrasyon difüzyonu ile birlikte şekil 2.9'da görülmektedir. Konsantrasyon bağımlı difüzyon, düşük konsantrasyondaki profile göre oldukça diktir ( $C \ll C_s$ ). Böylece karşı tip ile katkılanmış alttaş kullanıldığında, yüksek ani eklem bölgesi elde edilmektedir.





Şekil 2.8. Dışsal difüzyon için difüzyon sabiti-konsantrasyon grafiği [20]

Konsantrasyona bağlı difüzyon katsayısı analizi oldukça zahmetli olmasına rağmen daha kesin sonuçlar vermektedir. Fakat çinkonun InP difüzyonundaki deneysel çalışmalarda difüzyon katsayısı sabit alınır.

## 2.7. Difüzyon Yapılmış Tabaka (sheet) Direnci

Katman direnci nominal eşit kalınlıkta olan ince filmlerin direncinin bir ölçüsüdür. Katkılanmış katmanlar için ortalama katman direnci aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$R_s = \frac{1}{q \int_0^{x_j} \mu C(x) dx} \quad (2.19)$$

Burada  $x_j$  difüzyon derinliği,  $\mu$  taşıyıcı mobilitesi ve  $q$  katkı konsantrasyon dağılımıdır.

## 2.8. III-V Yarıiletkenlere Çinko Difüzyonu

Çinko difüzyonu genellikle InP alttaş üzerine lazer ve fotodiyod üretiminde temel ve tamamlayıcı işlemlerdir [21]. Fotoelektrik aygıtların performansında Zn difüzyonunu çok

kritik olmasından dolayı yapıdaki Zn profilinin kontrolü çok önemli bir hal almıştır. Sonuç olarak InP malzemesine Zn difüzyonunun anlaşılması çok önemli bir hal almıştır [22].

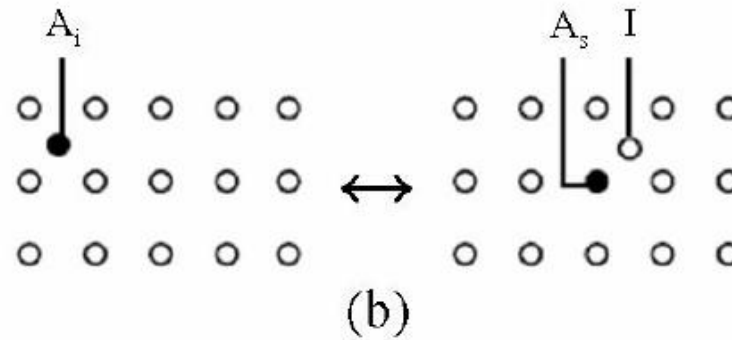
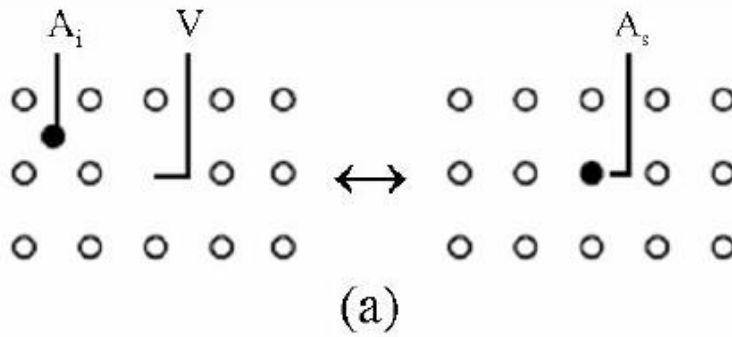
III-V yarıiletkenler için birçok katkı atomunun difüzyonu Arayer-Yeralan Mekanizması (interstitial-substitutional) ile açıklanmaktadır. Bu model ilk olarak Frank ve Turnbull (1956) tarafından germanyum içerisinde bakır difüzyonu açıklamak için önerildi. 1962 yılında Longini aynı modeli GaAs altaşa çinko difüzyonu için önerdi. Bu difüzyon mekanizmasında arayer ve yeralan siteler arasında değişen iki şekli vardır [13, 23, 24]. Bunlar ilki Frank-Turnbull mekanizmasıdır. Bu mekanizma boşlukları içerir ve aşağıdaki gibi ifade edilir,



İkincisi kick-out mekanizmasıdır ve şöyle ifade edilir,



Her iki mekanizmada Şekil 2.9'de şematik olarak temsil edilmektedir [9, 22, 25, 26].



Şekil 2.9. Frank-Turnbull ve Kick-out mekanizması [27]

Boşluk ile Frank-Turnbull mekanizması birbirine benziyor gibi gözükse de aslında oldukça farklıdır. Boşluk difüzyon mekanizmasında boşluk konsantrasyonu arttıkça difüzyon sabiti de artmaktadır. Fakat Frank-Trunbull durumunda boşluk konsantrasyonu arttıkça yeralan efektif difüzyon sabiti düşmektedir.

III-V yarıiletkenlere Kick-out mekanizması aracılığı ile gerçekleşen bir çok çinko difüzyonu çalışması yapılmıştır. Kick out mekanizması bir “katkı atomu” ile ”kendinden arayer” atomunun etkileşimini içemektedir [23].

- Kendinden-arayer olan In atomu, katkı atomu olan çinkoyu yeralan siteden arayer sitesine fırlatmaktadır.
- Yeralan katkı atomu olan çinko, arayer katkı atomu olduğu sırada kendinden-arayer atomu olan In düzenli latis atomu olmaktadır. Bu süreç katkı atomunu malzeme içerisinde serbestçe hareket etmesine olanak sağlar.
- Sonunda yerdeğiştirme sitesi katkı atomu tarafından işgal edilmek için uygun site olduğundan dolayı arayer katkı atomu başka bir yerdeğiştirme sitesine dönebilir ve başka “kendinden-arayer” atom yaratır.
- InP içerisine çinko için, kick-out reaksiyonları şöyle ifade edilebilir,



$\text{Zn}_s^-$  yeralan sitedeki negatif yüklü Zn atomları

$\text{I}_{\text{In}}^+$  pozitif yüklü kendinden interstitial atomları (In atomları)

$\text{Zn}_i^+$  pozitif yüklü arayer sitesindeki Çinko atomları

$h^+$  hol taşıyıcıları

InP malzeme içerisinde Zn atomları 3 ayrı formda oluşur. Hemen hemen iyonize alıcı Zn-formundaki tüm atomlar indium örgüsünde bulunurlar. Ayrıca iyonize olmyan Zn atomları ve iyonize arayer verici  $\text{Zn}_i^+$  atomları da aynı sitede bulunabilir. Sadece arayer atomları difüzyona katkı için yeterince hareketli olduğu kabul edilir. Bu nedenle InP içerisinde Zn difüzyonunun arayer atomlarının konsantrasyonuna bağlı olduğu gözlenmiştir [13].

Çinko, InP tabakasına arayer-yeralan kickoff mekanizmasıyla difüz olduğu zaman, yeralan site aracılığıyla olan difüzyondan daha yüksek bir aktivasyon enerjisine ihtiyacı vardır. Arayer difüzyonda atoma sadece zıplama enerjisi verilmesi gerekirken yeralan difüzyonda buna ek olarak boşluk elde edilecek enerji verilmelidir [27].

Fakat III-V yarıiletkenlerin difüzyon süreçleri, silikon örneklerine göre kontrolünün çok daha zor olduğu süreçlerdir. Bunun nedeni, V. grup elementlerinin difüzyon sıcaklığında yüksek buhar basıncına sahip olmasıdır. Bu ise V. grup elementin III-V yarıiletken yüzeyinden kolaylıkla termal olarak ayrışması anlamına gelmektedir. Bu çok ciddi bir problemdir [10, 28].

Fosfor atomlarının buharlaşması sonucu oluşan yüksek konsantrasyonlu fosfor boşlukları düşük konsantrasyonlu elektriksel olarak aktif çinko iyonlarını belirler. Difüzyon sırasında çinko atomları arayer latis sitesine hareket eder ve sadece indiyum altlatis içerisinde birleşik oluşturmazlar yani elektriksel olarak aktif rol oynarlar. Ayrıca çinko atomları fosfor boşlukları ile bağ yapmış halde bulunabilirler ve nötr bileşikler halinde bulunabilirler. Bu nötr bileşikler çinko atomlarını ve fosfor boşluklarını içermektedir ( $V_p\text{-Zn-}V_p$  veya  $\text{Zn-}V_p$ ).

Doğal Kompleks:  $\text{Zn}_i^+ + 2V_p + V_{In} \leftrightarrow V_p\text{Zn}V_p + h^+$

Nötr bileşiklerin oluşumu indiyum boşlukların içine çinko eklenmesinden daha muhtemel olduğundan, elektriksel olarak aktif çinko konsantrasyonu, toplam katkılanan çinko konsantrasyonundan azdır.

Difüzyon sırasında InP bulk kristalden fosfor buharlaşmasını azaltmak için, InP dilim üzerindeki fosfor basıncı daha üst seviyelerde tutulmaktadır. Uzun zaman, araştırmacılar çinko difüzyonu gerçekleştirmek için yeni yöntemler araştırdılar. (katı kaynaktan difüzyon, koruyucu dielektrik kaplaması ile difüzyon, polimerik çinko içeren filmlerden difüzyon).

Çinko katkı atomlarının elektriksel verimliliği optimize etmek için bir çok difüzyon tekniği çalışılmıştır [26, 29, 30].

Bu tekniklerden biri tercih edilirken katkı konsantrasyonunun ve difüzyon derinliğinin kontrolü, tekdüzelik, tekraredilebilirlik ve üretim maliyeti gibi şartlar gözönünde bulundurulur [31].

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar 3 aşamalı olarak ele alınmıştır. Öncelikle yalın InP malzeme yüzeyine çinko difüzyonu gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. İkinci aşamada InP yüzeyine maskeleme çalışmaları yapılmıştır. Bunun sebebi tüm yüzeyi p tipi katkılamak yerine sadece yüzeydeki istenilen bölgelerin p tipi katkılanması ve bu sayede aygıtların karanlık akımın düşürülmesi hedeflenmektedir. Üçüncü bölümde ise maskelendirilmiş InP malzemeye difüzyon çalışmaları anlatılmıştır. Deneysel ve karakterizasyon çalışmaları için Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezinin ve Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezinin alt yapıları kullanılmıştır.

- Yalın InP malzemeye çinko difüzyon fabrikasyonu
- InP yüzeyine maskeleme çalışmaları
- Maskelenmiş InP malzemeye çinko difüzyon fabrikasyonu

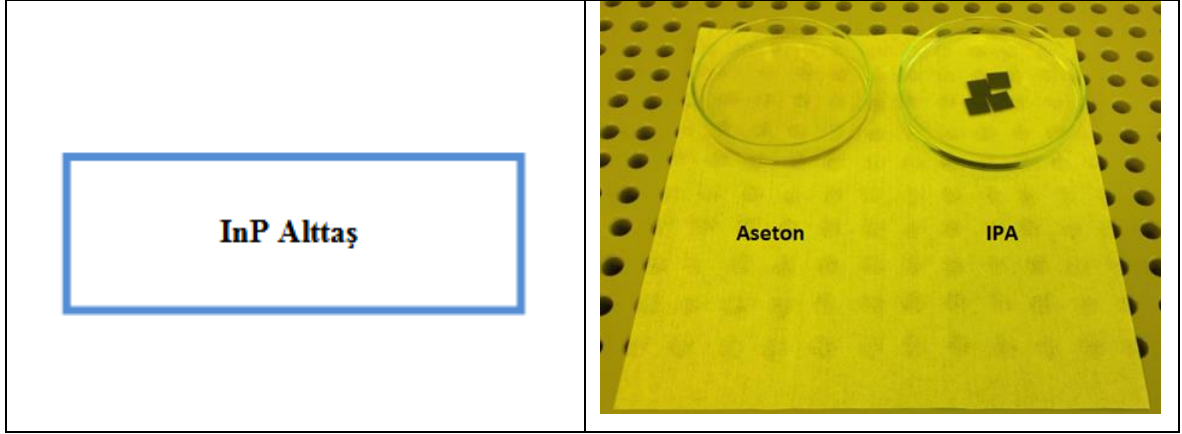
Fabrikasyonda kullanılan InP malzemenin demir-katkılı, yarı-yalıtlımlı, direnç değeri  $10^{+7}$  ohm.cm büyük olan tek kristal şeklinde özelliklere sahiptir.

#### 3.1. Yalın InP Malzemeye Çinko Difüzyon Fabrikasyonu

InP alttaşı çinko atomları ile katkılamak için araştırılıp geliştirilen fabrikasyonunun ayrıntıları aşağıda verilmiştir.

##### 3.1.1. Kesim ve temizlik

4” lik InP yonga Dicer cihazında 12x12 mm<sup>2</sup> boyutunda kesilerek örnek boyutu fabrikasyona uygun hale getirilir. Bu kesim sırasında yüzey fotoresist ile korunur. Kesim işleminden sonra örnekler çıkartılır ve fabrikasyona hazır hale gelebilmesi için örnekler temizlenir. Kesilen yonga ların yüzey temizliğini yapmak için örnek yüzeyi yukarı gelecek şekilde, 5 dakika ultrasonik yöntemle aseton içerisinde temizlenir. Aseton sonrası örnek hemen isopropanol alkol içerisine alınır ve 2 dakika temizlenir. Temizlenen örnek azot (N<sub>2</sub>) ile kurutulur. Şekil 3.1’de InP alttaş kesiti ve temizlik adımı görülmektedir.

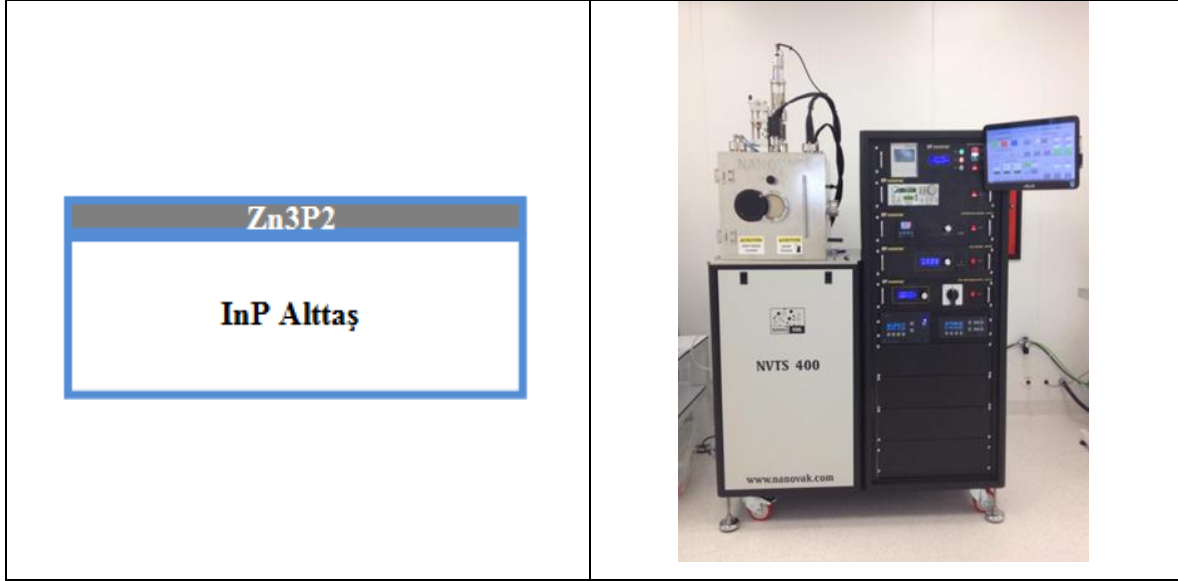


Şekil 3.1. InP alttaş kesiti ve temizlik adımı

### 3.1.2. Çinko Fosfit ( $Zn_3P_2$ ) kaplama

Bu adımda temizlenen InP örneklerine çinko difüzyon malzemesi kaplanır. İnce film kaplama cihazında, vakum altında, ısıtılarak buharlaştırılır ve örnek yüzeyine kaplanır. İnce film kaplama sistemi olarak Nanovak firmasının NVTs 400 sistemi kullanılmıştır. Bu sistem özellikle çinko difüzyon fabrikasyonu için tasarlanmıştır. Bu sebeple sistemde hem termal fiziksel buhar biriktirme hem de radyo frekansı (rf) magnetron kopartma (sputter) kaplama yapabilmektedir.

Örnekler ilk olarak 4 inçlik silisyum yongasına yapıştırılır. Bu işlem için özel vakum bandı kullanılır. Örnekler, yüzeyleri ince film kaynağına bakacak şekilde yerleştirilir.  $Zn_3P_2$  kaplamadan önce örnekte doğal oksit tabakasını ve kirlilikleri temizlemek amaçlı Argon plazma temizliği yapılır. Kaplama kalitesi yüksek olabilmesi için kaplamanın yüksek vakum ortamında yapılması gerekmektedir. Kaplama  $3,0 \times 10^{-6}$  Torr değerinde yapılmaktadır. Kaplama hızı 2,5-3,0 Å/s olacak şekilde 1100 Å  $Zn_3P_2$  kaplanır[32]. Kaplama hızı yüksek olursa malzeme örneğe gelmeden önce damlacık (droplet) şeklinde birleşir ve kaplama kalitesini düşürür. Şekil 3.2'de  $Zn_3P_2$  kaplı alttaş kesiti ve kaplama sistemi görülmektedir.

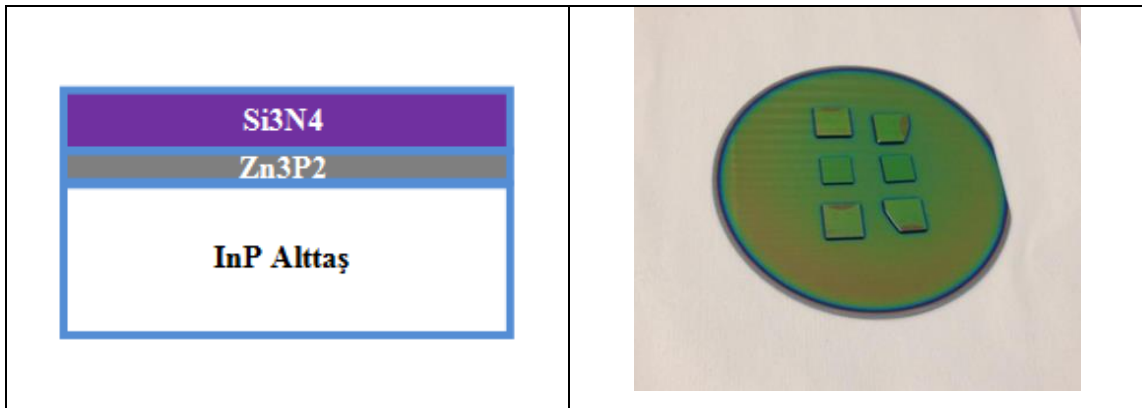


şekil 3.2.  $Zn_3P_2$  kaplı alttaş kesiti ve kaplama sistemi

### 3.1.3. Silikonitrat ( $Si_3N_4$ ) kaplama

NVTS 400 sisteminde  $Zn_3P_2$  malzemesi kaplandıktan sonra vakum ortamı bozulmadan silikonitrat malzemesinin kaplanmaktadır.  $Si_3N_4$  kaplama işlemi kopartma yöntemi ile yapılmaktadır. Bu yöntemde yüksek gerilimle hızlandırılan iyonlar hedef malzemenin yüzeyini bombardıman eder ve bombardıman sonucu sökülen moleküller alttaş üzerine birikir. Bu sistemin en büyük avantajlarından bir tanesi de düşük sıcaklıklarda biriktirme işlemi yapılabilmesidir. Böylece örnek ısı bir işleme maruz kalmadan kaplanmış olur. Sistemde %99,9 saflıktaki  $Si_3N_4$  hedef kullanılmaktadır.

Örnek yüzeyi 175 W güç değerinde , 7 mTorr basınç altında 3500 Å  $Si_3N_4$  sputter edilir. şekil 3.3'de  $Si_3N_4$  kaplı örnek kesiti ve kaplama sonrası örnekler görülmektedir.



şekil 3.3.  $Si_3N_4$  kaplı örnek kesiti ve kaplama sonrası örnekler

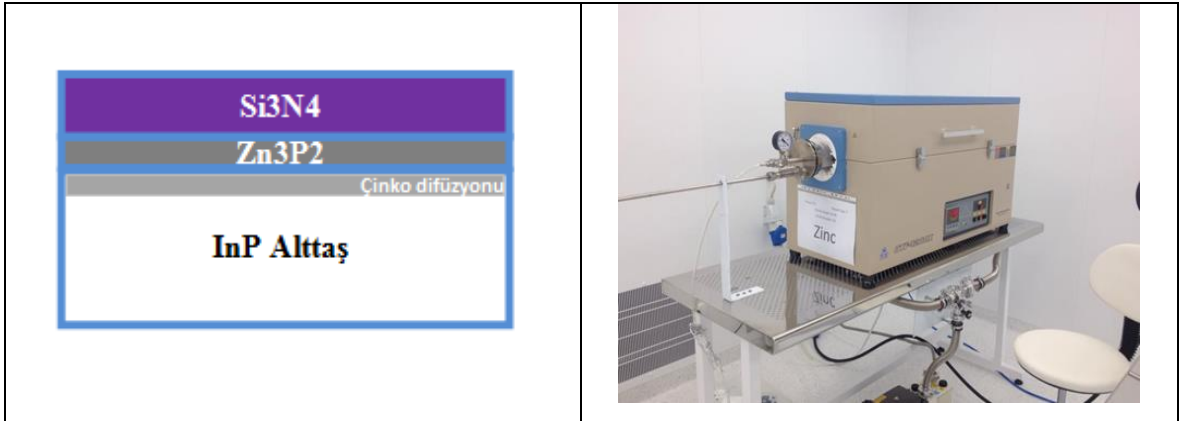
### 3.1.4. Termal difüzyon

Termal difüzyon işlemi için üç farklı sistem kullanılmıştır. Bunlar difüzyon fırını, hızlı termal tavlama (RTA) sistemi ve PVD sistemidir. Difüzyon fırını ve RTA sistemlerinde vakum ortamı yaratılmadan, PVD sisteminde ise vakum altında denemeler yapılmıştır. Sonuçlar bölümünde ise bu sistemlerde elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

#### Difüzyon fırını:

Difüzyon, MTI 1200 X tipi termal fırınında gerçekleştirilir. Her hangi bir vakum ortamı olmadan yapılan bu difüzyon “açık tüplü difüzyon” olarak adlandırılır.

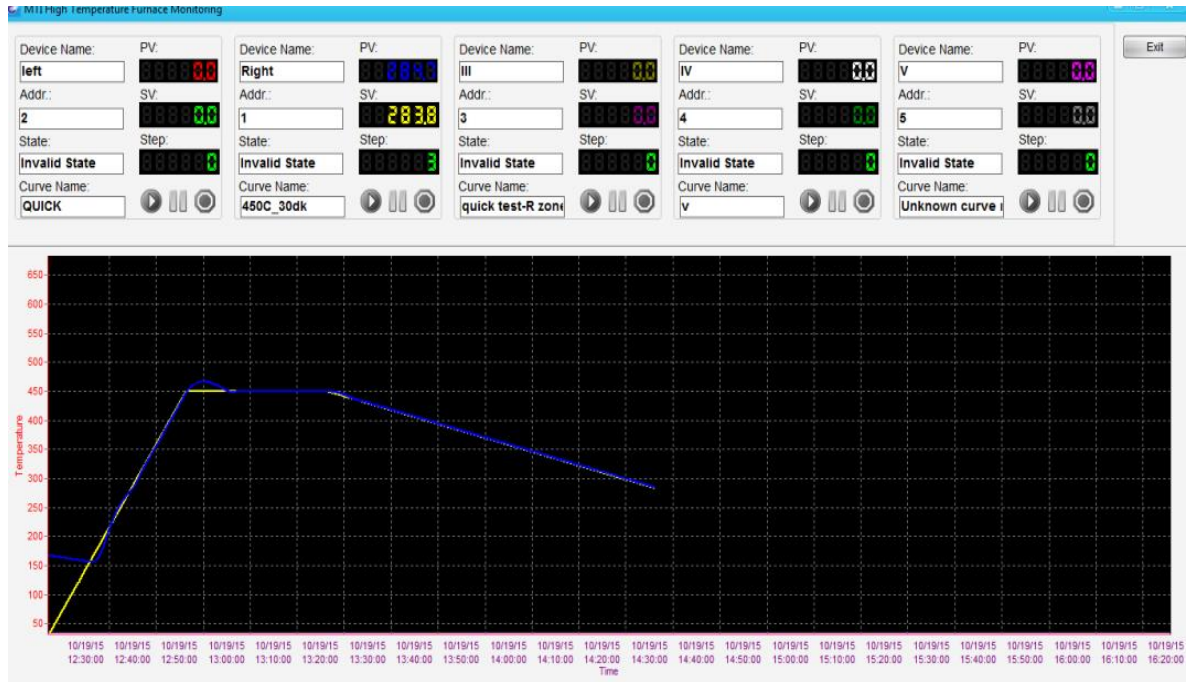
Örnek, üzeri açık quartz bir parçanın içerisinde termal fırının tam ortasına yerleştirilir. Örnek yerleştirildikten sonra fırının içerisi yarım saat 5 lt/dk akış hızıyla N<sub>2</sub> ile temizlenir. İşlem başlatıldıktan sonra N<sub>2</sub> akış hızı 1 lt/dk olarak ayarlanır ve difüzyon süresince bu hız değerinde sabit tutulur. İlk fabrikasyonda 435 °C, 440 °C ve 455 °C’lerde 30 dk. difüzyon yapıldı. İstenilen sıcaklığa 30 dk. da çıkacak şekilde ayarlandı. İkinci fabrikasyonda 455 °C de 10 dk. ve 20 dk. süresince difüzyonlar yapıldı (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Difüzyon sonrası örnek kesiti ve difüzyon fırını

Bilgisayar kontrollü olarak difüzyon parametleri belirlenir. Şekil 3.5’de bilgisayar yardımıyla elde edilen sıcaklık-zaman grafiği görülmektedir.





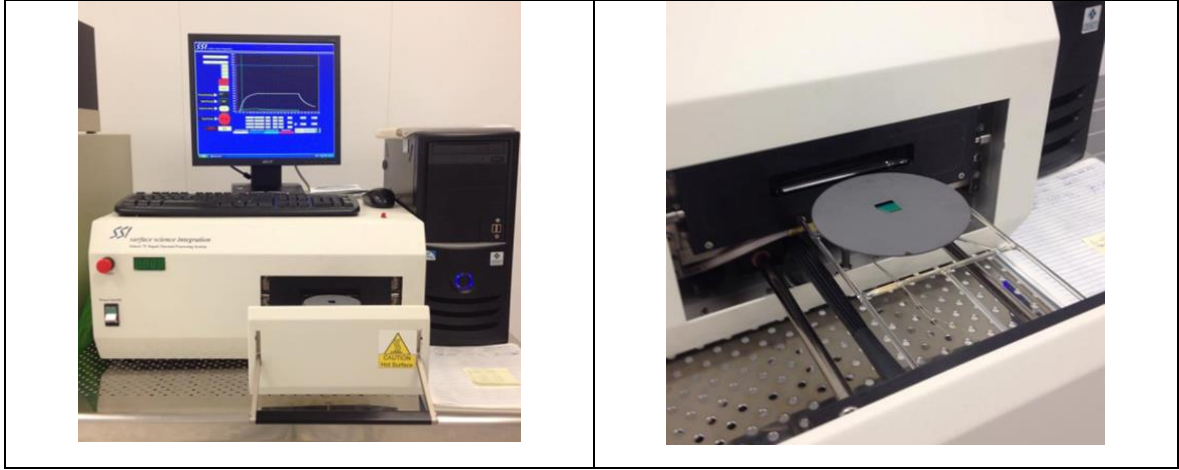
Şekil 3.5. Bilgisayar programlı fırın kontrolü

#### Hızlı Termal Tavlama (RTA) sistemi:

Difüzyon, SSI SOLARIS 75 marka Hızlı Termal Tavlama Sisteminde gerçekleştirilir. (Şekil 3.6)

Bu sistemin en önemli avantajı istenilen sıcaklığa hızlı bir şekilde ulaşım ve hızlı bir şekilde soğumasıdır. Cihaz içerisinde bulunan halojen lambalar yardımı ile 200 °C/s hız ile istenilen sıcaklıklara çıkılabilmektedir. Sıcaklık kontrolcüsü ve işlemciler yardımı ile istenilen sıcaklıkta istenilen sürelerde örneklerin hızlı ısı işlemleri tamamlanmaktadır [31].

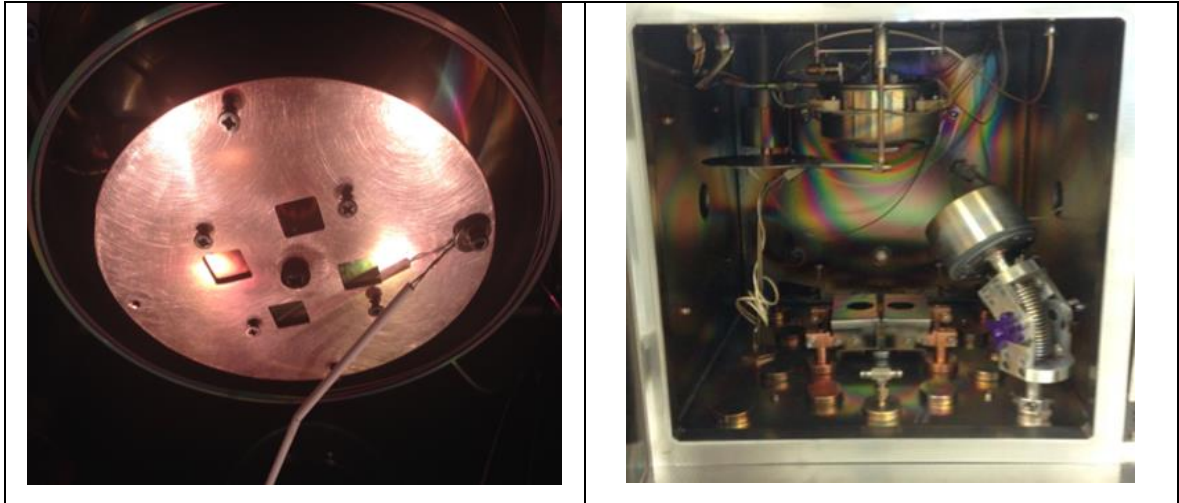
RTA sisteminde örnekler 450 °C’de farklı sürelerde ve Forming Gaz ( 5% H<sub>2</sub>, 95% N<sub>2</sub> ) ortamında difüzyon yapılmıştır.



Şekil 3.6. Hızlı termal tavlama (RTA) Sistemi

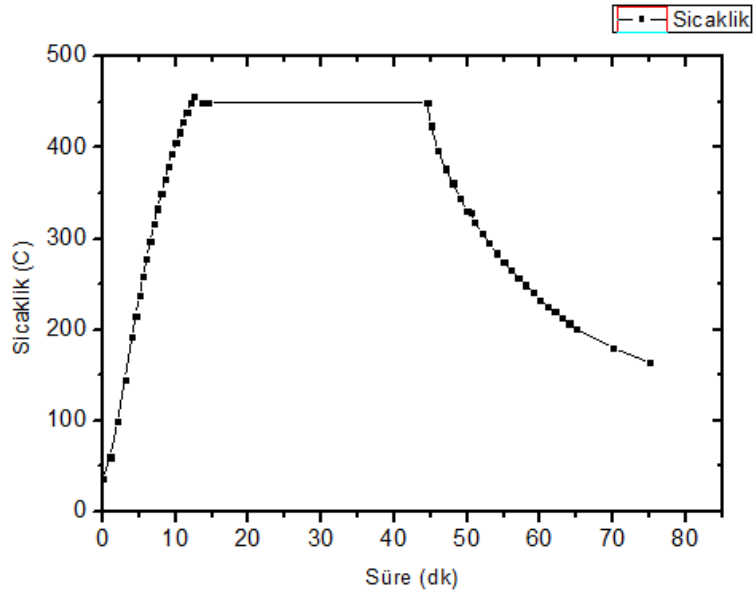
### PVD sistemi

Termal difüzyon NVTS 400 sisteminde yapılmaktadır. Şekil 3.7’de PVD sisteminin içerisi görülmektedir. Bu sistemde hem  $Zn_3P_2$  hem de  $Si_3N_4$  malzemesi kaplanan örnekler vakum ortamı bozulmadan ısıtılmaktadır. Isıtma işlemi Argon ortamında 100 mTorr vakum değerinde yapılmaktadır. Bu yöntem ile örnekler 450 °C’de difüzyon yapılmaya çalışılmıştır.



Şekil 3.7. NVTS 400 sistemi

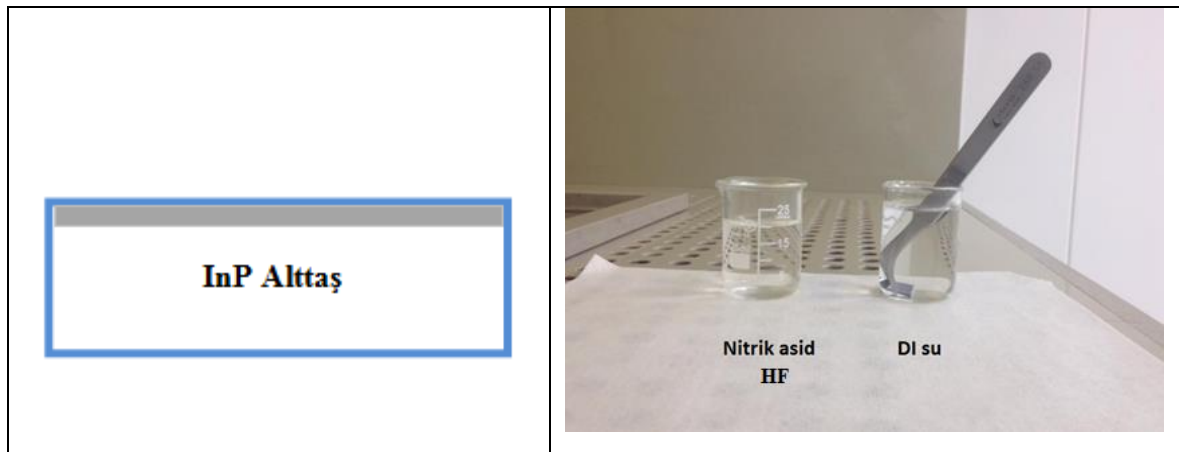
PVD sistemi için sıcaklık-zaman grafiği Şekil 3.8'deki gibidir.



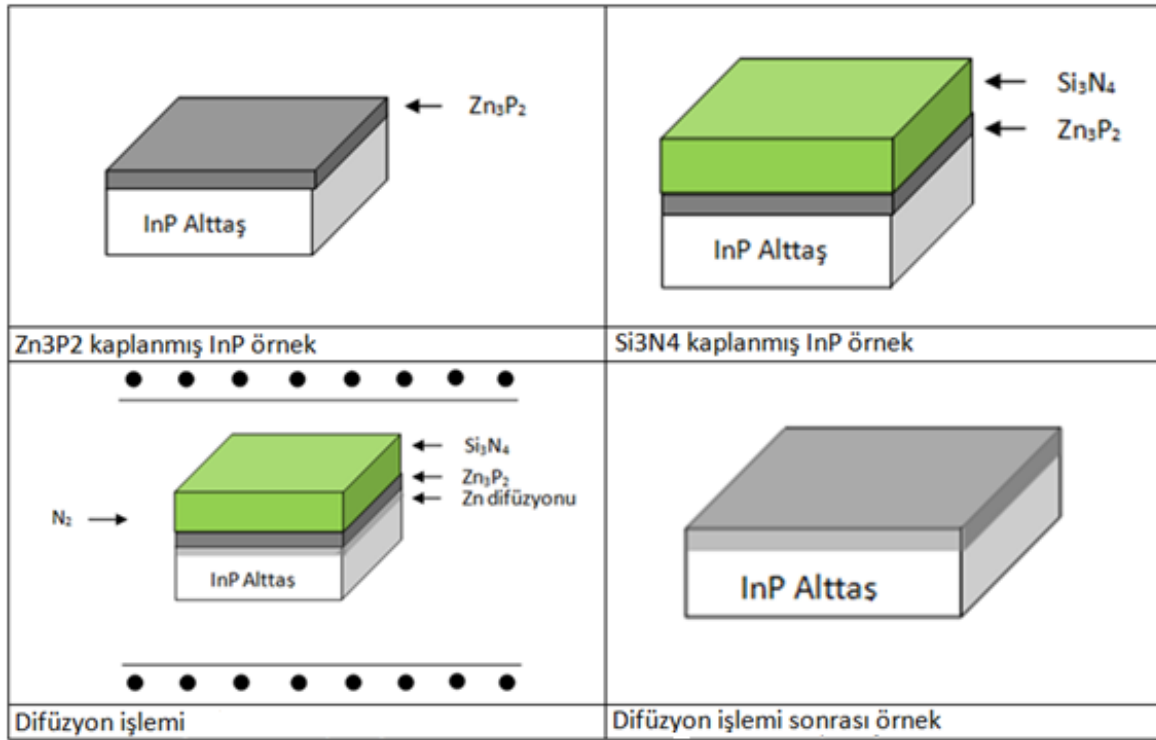
Şekil 3.8. NVTS 400 sistemi sıcaklık-zaman grafiği

### 3.1.5. Asidik temizlik

Temizlik işleminde önce örnekler HF:Nitrik asid 1/1 karışımında 10 saniye bekletilir sonra bolca Deiyonize su ile durulanır. Örneklerin yüzeyi kuru azot ile kurutulur ve sıcak yüzeyde 110 °C'de 30 saniye kadar bekletir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Temizlik sonrası örnek kesiti ve temizlik adımı



Şekil 3.10. Üretim süreci

### 3.2. Difüzyon Maske Optimizasyonu

Desenli alttaş içerisinde çinko difüzyonu için  $Zn_3P_2$  kaplamasından önce  $Si_3N_4$  maske katmanı biriktirilir. Bu maskenin amacı alttaşın sadece istenilen bölgelerine çinko difüzyonunun yapılmasıdır. İstenilmeyen bölgeler ise  $Si_3N_4$  ile kaplı olduğu için o bölgelere herhangi bir katkılama yapılmamış olacaktır. Çinko difüzyonunun maskelenmesi için  $Si_3N_4$  katmanının minimum bir kalınlığa sahip olması gerekmektedir. Ayrıca maske katmanı sonradan uygulanacak olan termal işlemler karşısında deforme olmamalıdır. Bu yüzden difüzyon maskesi ile 3 farklı difüzyon sistemi test edilmiştir.

Bu çalışmada 100 nm, 200 nm ve 400 nm  $Si_3N_4$  maske katmanı kullanılmıştır. Biriktirme şartları çizelge 3.1’de verilmiştir.

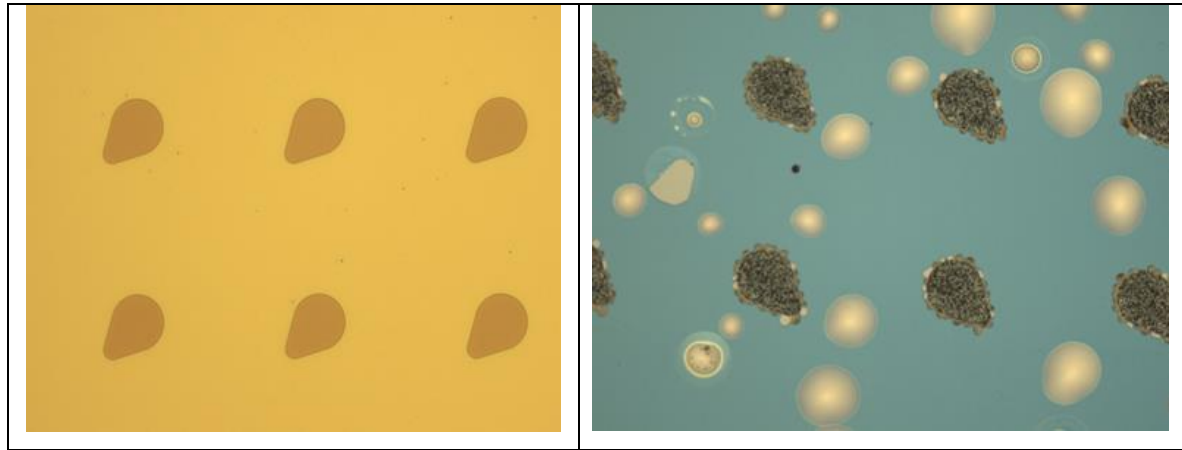
Çizelge 3.1. PECVD Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>'ın biriktirme şartları

Kalınlık (nm)	100	200	400
Güç (W)	50		
Basınç (Pa)	80		
Sıcaklık(°C)	320		
SiH <sub>4</sub> (sccm)	300		
NH <sub>3</sub> (sccm)	15		
Ar (sccm)	50		
Biriktirme Zamanı (dk)	12	24	43

Kaplamalar sonrası örnekler 1100 Å Zn<sub>3</sub>P<sub>2</sub> ve 3500 Å Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> koruyucu katman kaplanmıştır.

### 3.2.1. Termal fırın ile difüzyon maskesi

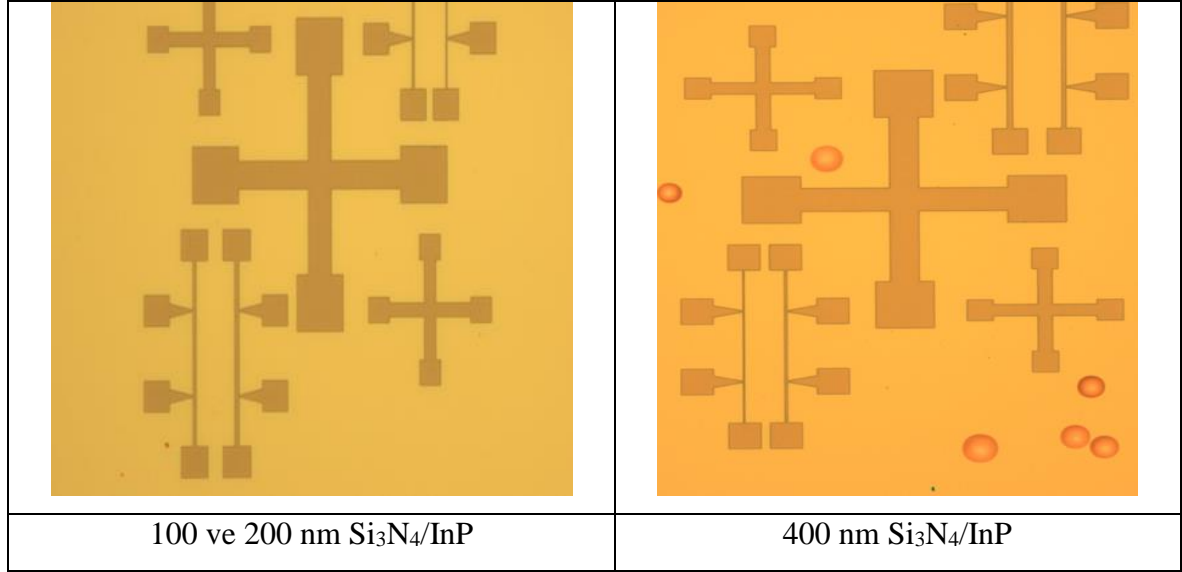
Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kalınlıkları farklı üç örnek önceden 450 °C ye ısıtılan termal fırının içerisine metal çubuk ile hareket ettirilerek yerleştirildiğinde maske katmanlarının hepsinde parçalanmalar gözlemlendi. Maskenin termal süreç öncesi ve sonrası mikroskop görüntüleri Şekil 3.11'de görülmektedir.



Şekil 3.11. Difüzyon maskesinin ısıtılma öncesi ve sonrası

Termal fırın ile diğer denemelerde örnekler oda sıcaklığında fırının içerisine yerleştirilip istenilen sıcaklığa geliş süresi uzatıldı. Fabrikasyonlarda bu süreler 20 ile 30 dk. arasında değiştirildi. Böylece difüzyon maskesindeki bu parçalanmaların önüne geçildi. Şekil 3.12'de görüldüğü gibi 100 ve 200 nm'lik Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ile maskelemiş örnekler ısıtılma

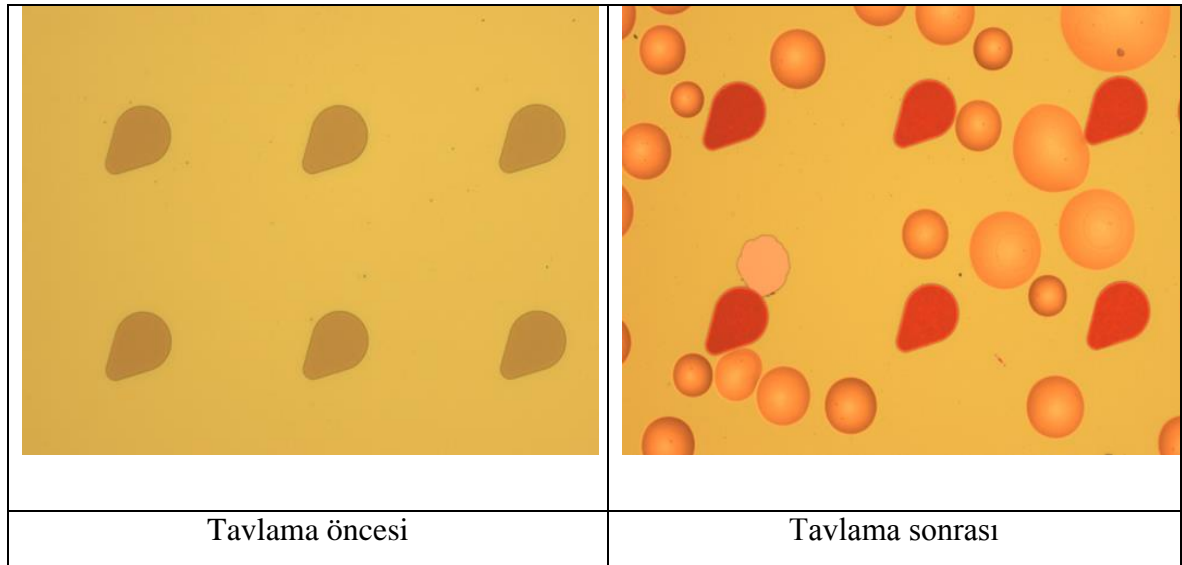
sonrası deforme olmadığı görülmüştür. 400 nm'lik  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ile maskelenmiş örnekte ise desenlenmiş bölümler dışındaki yerlerde kavlamalar görülmüştür.



Şekil 3.12. Termal fırın ile ısıtılma sonrası difüzyon maskeleri

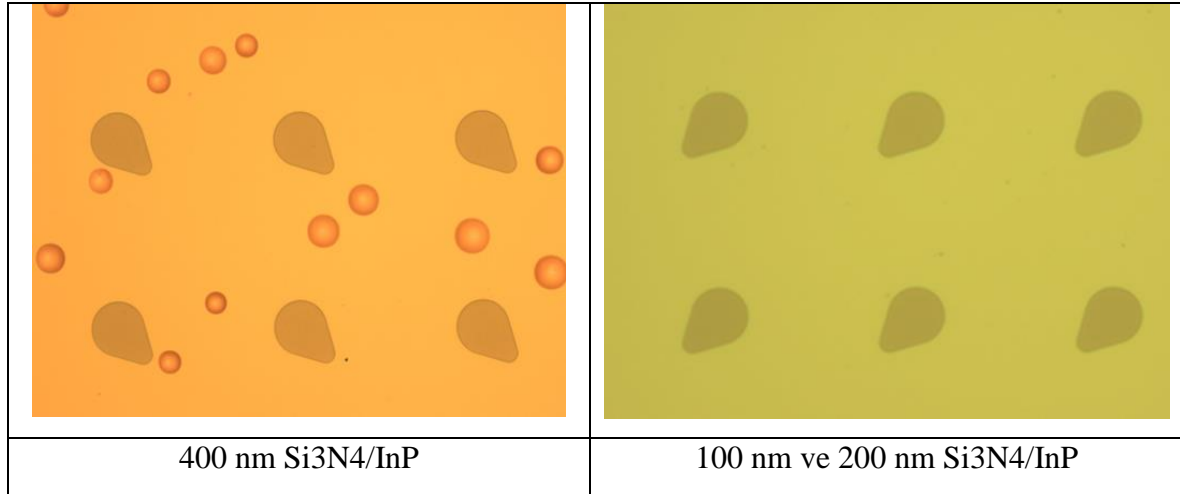
### 3.2.2. Hızlı termal tavlama ile difüzyon maskesi

RTA sisteminde örnekler 25 °C/s hız ile istenilen sıcaklıklara çıkılacak şekilde ayarlandı. 450 °C'de gerçekleştirilen difüzyon işlemi sonrası difüzyon maskesinde parçalanmalar gözlenmiştir. Şekil 3.13'de tavlama öncesi ve sonrası örnek fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 3.13. RTA ile ısıtılma sonrası difüzyon maskeleri-1

Isınma hızı 4 °C/s ye indirildiğinde termal fırındaki gibi 100 nm ve 200 nm Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kalınlığındaki maskelerde herhangi bir bozulma görülmemiştir. 400 nm Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> maskenin ise desenli bölümlerin dışında kavlamalar görülmüştür. (Şekil 3.14)



Şekil 3.14. RTA ile ısı işlem sonrası difüzyon maskeleri-2

### 3.2.3. Termal buharlaştırma sistemi ile difüzyon maskesi

Termal buharlaştırma sisteminde Zn<sub>3</sub>P<sub>2</sub> ve Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kaplandıktan sonra vakum ortamı bozulmadan difüzyon denemeleri yapıldı. Termal işlem öncesi vakum değeri 100 mtorr a ayarlandı. Maskenin termal süreç öncesi ve sonrası mikroskop görüntüleri Şekil 3.15’de görülmektedir. Difüzyon maskesinde ve koruyucu katmanda deformeler oluşmuştur.



Şekil 3.15. PVD ile ısı işlem sonrası difüzyon maskeleri

Bu çalışma sonucunda difüzyon maskesi olarak 100 ve 200 nm Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, difüzyon sistemi olarak da Termal fırın ve RTA sistemi kullanılmıştır.

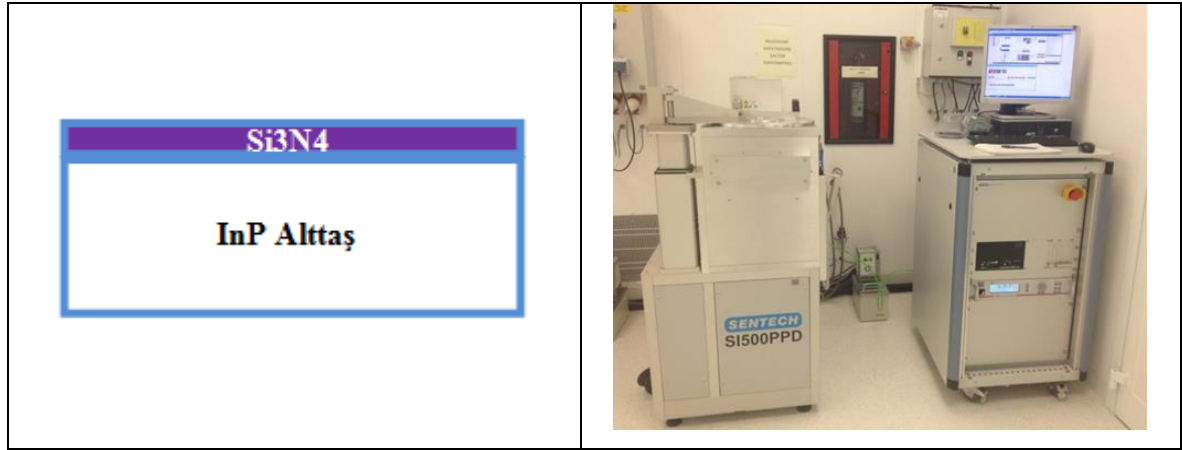


### 3.3. Desenli Çinko Difüzyon Fabrikasyonu

Çinko atomlarını sadece InP alttaşın istediğimiz bölgelere katkılar için fabrikasyonun ayrıntıları aşağıda verilmektedir.

#### 3.3.1. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kaplama adımı

Bu adımda örneklerin yüzeye kimyasal buhar kaplama yöntemi ile Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kaplaması yapılmaktadır. Bu adımın amacı difüzyondan önce tüm yüzeyi kapatmak ve bu kaplamada aygıt tasarımında belirlenen şekilde ve yerlere açıklıklar yaparak, çinko metali difüzyonunu bu açıklıklara yapmaktır. Kaplama işleminden önce örnek tekrar aseton, isopropanol alkol ve deiyonize su ile temizlenmiştir. Kimyasal buhar kaplama cihazı ile Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> tabakası 100 nm kalınlığa kadar büyütülmüş ve bu kalınlık elipsometre cihazında kontrol edilmiştir. Kullanılan gazlar ve kaplama koşulları; SiH<sub>4</sub>: 300 sccm, NH<sub>3</sub>: 15 sccm, Ar:30 sccm, RF: 50 W, Basınç: 80 Pa ve sıcaklık 320 °C dır. Bu koşullarda yaklaşık 12 dk. kimyasal biriktirme yapıldığında 100 nm kalınlığında Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> elde edilir (Şekil 3.16). Kaplama işleminden sonra örnek tekrar aseton, isopropanol alkol ve deiyonize su ile temizlenmektedir.



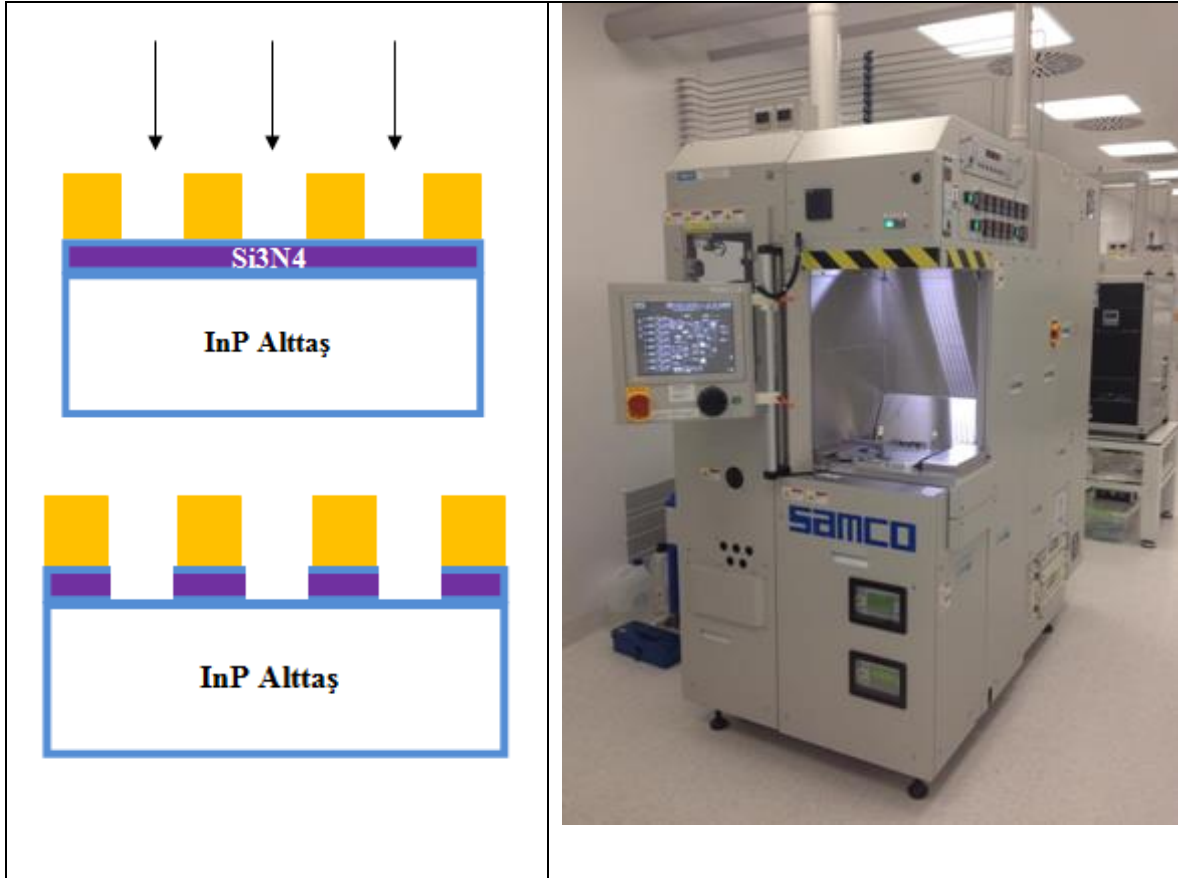
Şekil 3.16. İlgili adım kesiti ve Sentech PECVD sistemi

#### 3.3.2. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> pencere açma adımı

Örnek yüzeyine fotolitografi işlemi uygulanarak, örnek yüzeyindeki bazı bölgelerin açma işlemi yapılır. Fotolitografi işleminde Microchemicals firmasının AZ 5214 fotodirenç polimeri kullanılmaktadır. Fotodirenç polimeri, bir çevirici (spinner) yardımı ile yüzeye homojen olarak kaplanır. Maske hizalama cihazı (Suss MA6) kullanılarak, fotomaskenin ada açma adımı örnek üzerine işlenir.



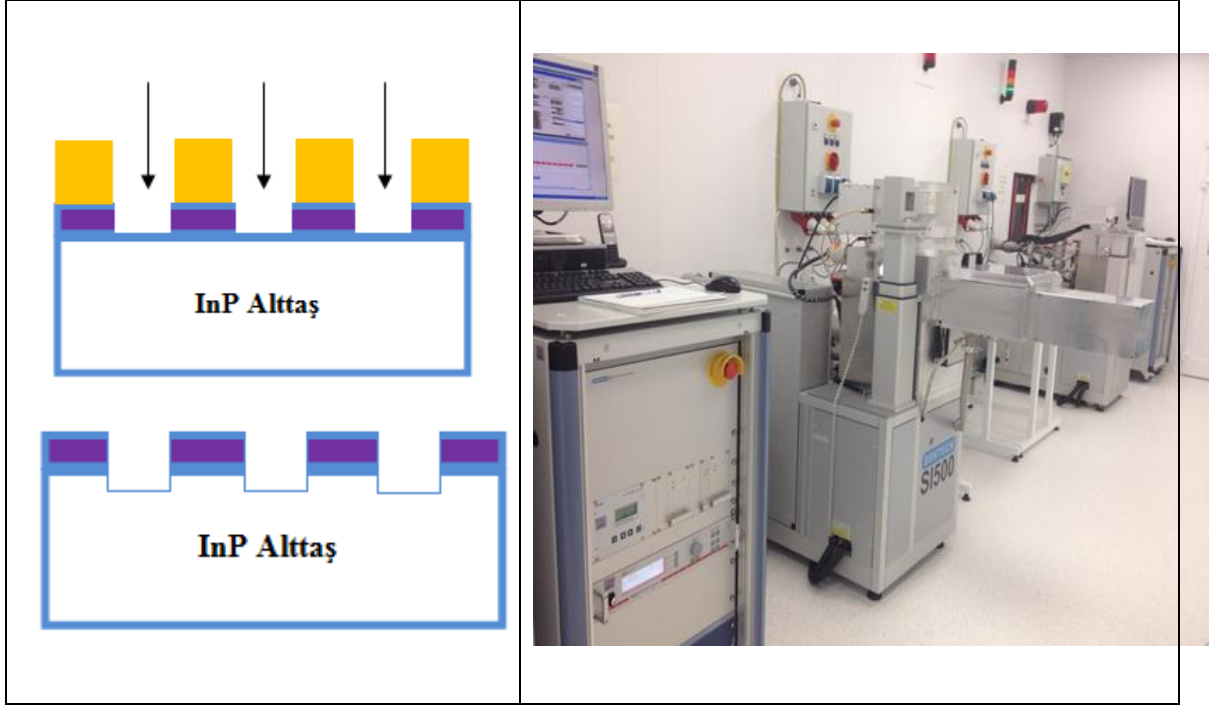
Şekil 3.17'deki Samco ICP-RIE cihazında  $\text{Si}_3\text{N}_4$  aşındırılması için fabrikasyon sırasında çeşitli denemeler yapılmış ve sonuçta şu reçete uygun bulunmuştur. Kullanılan gaz  $\text{CHF}_3$  akış 10 sccm, RF güç 400 watt, plazma basıncı 0,6 Pa ve aşındırma süresi 1 dakikadır. Böylece  $\text{Si}_3\text{N}_4$  örnek yüzeyine kadar aşındırılır. Bu aşındırma derinliği yaklaşık olarak 100 nanometredir. Uyguladığımız reçete 150 nm/dk ile aşındırma işlemini yapmaktadır.



Şekil 3.17. İlgili adım kesiti ve Samco ICP-RIE sistemi

### 3.3.3. InP yüzey desenleme

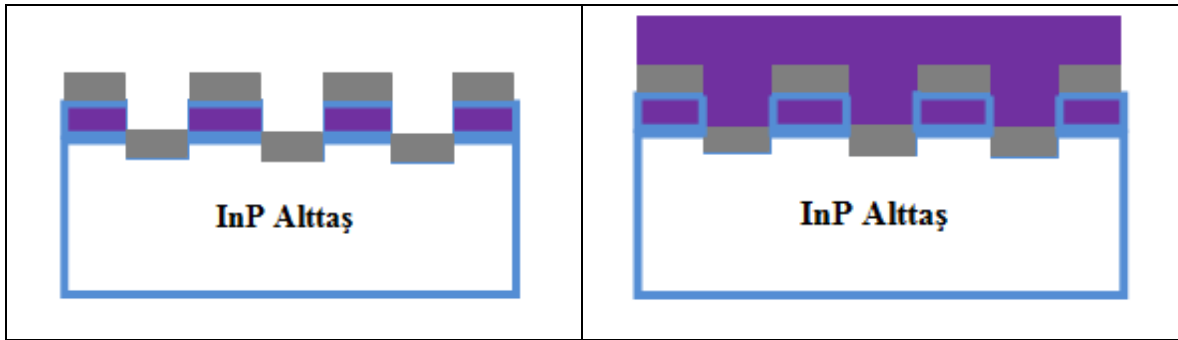
$\text{Si}_3\text{N}_4$  aşındırma adımından sonra fotoresist malzeme yüzeyden temizlemeden InP yüzeyde iz bırakmak için aşındırılır. Bu adımın amacı burada oluşturulan desenlere ileriki adımlarda hizalama yapabilmek içindir. Aksi takdirde hangi bölgelere çinko difüzyonu yapıldığını anlaşılmaz. Sentech ICP-RIE cihazında InP aşındırılması yapılmıştır. Burada kullanılan reçete  $\text{BCl}_3$  akış 20 sccm,  $\text{Cl}_2$  akış 10 sccm, Ar: RFgüç 400 watt, plazma basıncı 0,6 Pa ve aşındırma süresi 30 saniyedir. Böylece InP yaklaşık 95 nm aşındırılır.



Şekil 3.18. İlgili adım kesiti ve Sentech ICP-RIE sistemi

### 3.3.4. $Zn_3P_2$ ve $Si_3N_4$ kaplama

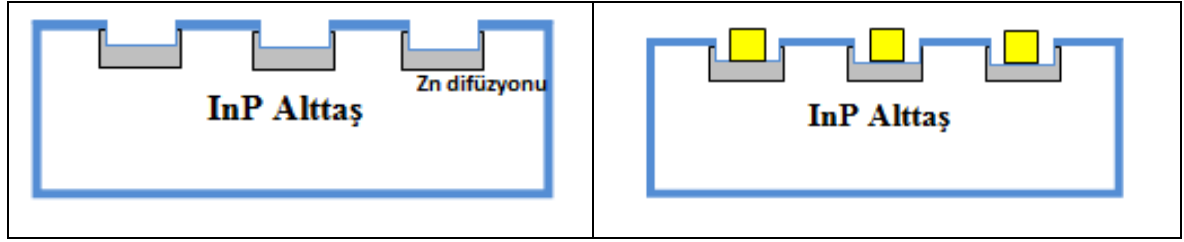
Örnek üzerine NVTS 400 sisteminde öncelikle 110 nm  $Zn_3P_2$  sonrasında 300 nm  $Si_3N_4$  malzemeleri kaplanmaktadır (Şekil 3.19).



Şekil 3.19. Örnek yüzeyine  $Zn_3P_2$  sonrasında  $Si_3N_4$  kaplanması

### 3.3.5. Difüzyon

Termal fırın ya da RTA sistemi kullanılarak çinko difüzyonu gerçekleştirilir. Bu malzemelerin temizlikleri için örnek HF:Nitrik asid 1/1 karışımında 60 saniye bekletilir sonra bolca DI su ile durulanır. Bu adımdan sonra örnek fabrikasyonun devamı için hazır hale gelmiş olur (Şekil 3.20). Fotodedektör uygulamalarında bu adımdan sonra genellikle p kontak metali kaplama adımına geçilir.



Şekil 3.20. Temizlik sonrası örnek

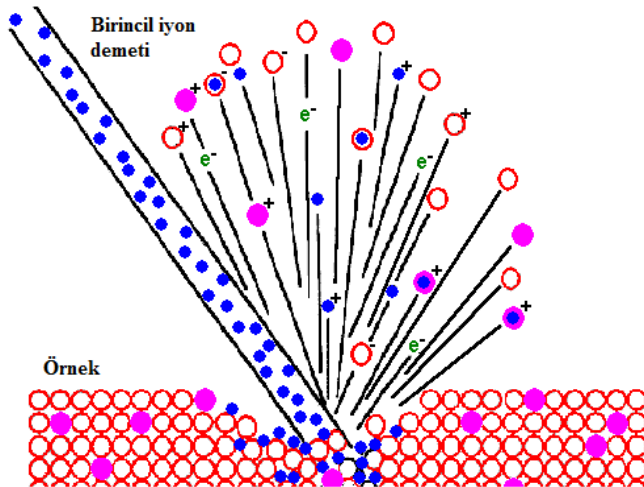


## 4. SONUÇLAR ve ANALİZLER

Bu tez çalışmasında atomik çinko konsantrasyonu İkincil İyon Kütle Spektroskopisi (SIMS) yöntemi ile gerçekleştirildi. Elektriksel ölçüm için ise Van der pauw tekniği ile hall ölçümü yapılmıştır.

### 4.1. Atomik Çinko Konsantrasyonu ve Profil

Günümüzde, katı maddelerin özellikle yarıiletken ve ince filmlerin içerisindeki elementlerin analizinde SIMS yaygın olarak kullanılmaktadır. SIMS, bir katının yüzeyinde ve içerisinde farklı tipteki atomların türünü ve miktarlarını tanımlamak için kullanılan deneysel bir tekniktir. Ayrıca katıların birkaç mikrometre derinliğe kadar elementel ve izotopik analizlerinde kullanılır. Bu teknikte, yüksek vakum ortamında iyon kaynaklarından elde edilen iyonlar, uygun voltaj altında hızlandırılarak analiz edilecek numune yüzeyine çarptırılırlar. Bu çarpışma sırasında, numune yüzeyi yavaşça aşındırılır. Saçılma sırasında sürekli derinliğin fonksiyonu olarak bilgi üretir ve buna derinlik profili denir. İyon demetinin numune ile etkileşimi sonucu incelenen numune yüzeyinden sıçratılan (ikincil) iyonlar, manyetik alan altında kütlelerine göre ayrılırlar ve uygun detektörlerle sayılırlar. İkincil parçacıklar negatif, pozitif ve nötr yükler taşımaktadır ve sıfırdan bir kaç yüz eV aralığında kinetik enerjiye sahiptir. SIMS sisteminin çalışma prensibi Şekil 4.1'de görülmektedir. SIMS için farklı Birincil demet çeşitleri vardır. Bunlar genelde enerjileri 1 ve 30 keV arasında değişen  $Cs^+$ ,  $O_2^+$ ,  $O$ ,  $Ar^+$  ve  $Ga^+$  kaynaklarıdır. Birincil iyonlar yüzeye 1 ile 10 nm arasında implant edebilirler [33, 34].



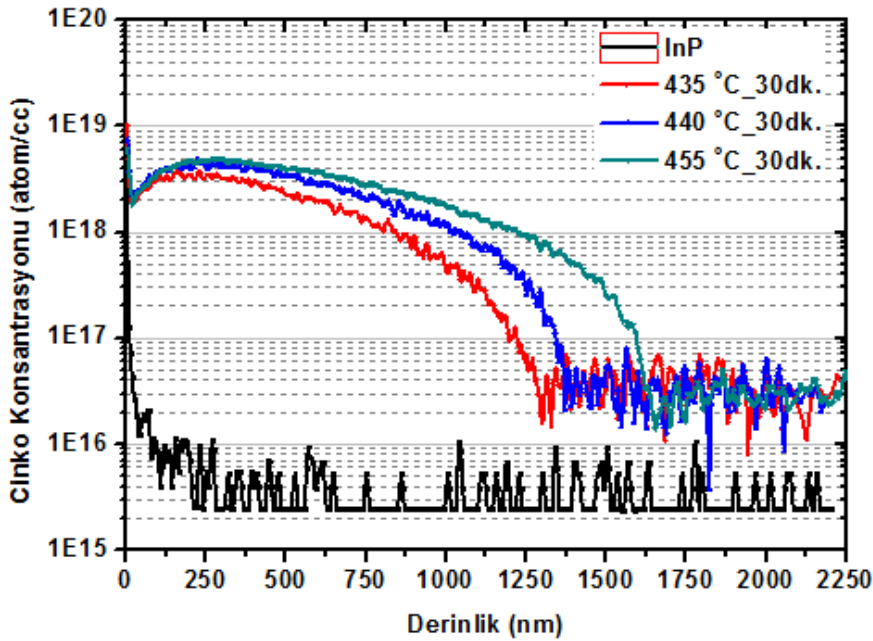
Şekil 4.1. SIMS çalışma prensibi[34]

Katı bir numune, sisteme yerleştirilip analize başlandığında, enerjisi birkaç keV olan iyonlar tarafından saçılır, hedeften yayılan partiküllerin bir kısmı iyonlaştırılır. İkincil iyon kütle spektrometresi, kütle spektrometresi ile bu ikincil iyonların analizini içerir. İyon bombardımanı altında, katı bir yüzeyden ikincil iyon salınımı en üstteki atomik tabakanın elementeli, izotopisi ve moleküler yapısı hakkında bilgi sağlar. Oluşturulan ikincil iyonlar, kimyasal çevreye ve kopartma koşullarına (iyon, enerji, açı) göre büyük ölçüde değişir. SIMS, elementel ve izotopik yüzey analizi için en hassas tekniktir. Saçılma hızı aşırı derecede yavaş olduğunda, atomik tektabanın onda birinden daha az tüketerek tüm analizler gerçekleştirilebilir. Bu yavaş saçılma moduna derinlik profilinde kullanılan “dinamik SIMS” analizin aksine “statik SIMS” denir. Sığ saçılma, numune yüzeyinde bulunan organik maddelerin zararını en aza indirir [35].

Vakum ortamında, malzemenin herhangi bir tipine (metal, yarıiletken, yalıtkan) uygulanabilir. Çoğunlukla moleküler karakterizasyonu sağlayan statik SIMS en üst tek tabaka üzerine konsantre olurken, dinamik SIMS modunda, elementlerin hacim (bulk) kompozisyonu ve derinliklerdeki dağılımı, en alt yapıdan en üst yapıya kadar derin bir çözünürlük ile incelenir. Bu nedenle SIMS, ileri malzemelerin araştırılması için en yaygın yüzey analiz tekniklerinden biridir.

#### **4.1.1. Sabit süre - Farklı sıcaklık**

Öncelikle difüzyon sistemi olarak termal fırın kullanılmıştır. Termal fırın, difüzyon sıcaklığı 435 °C, 440 °C ve 455 °C ve bu sıcaklıklara ulaşma süresi 30 dakika olacak şekilde ayarlandı. Sırasıyla difüzyon derinlikleri 1250 nm, 1380 nm ve 1620 nm dir. Maksimum çinko konsantrasyonu ise sırasıyla  $3,68 \times 10^{18}$ ;  $4,19 \times 10^{18}$  ve  $4,81 \times 10^{18}$  atom/cc dir. Analizler için Zn dedekte limiti is  $\sim 3 \times 10^{15}$  atoms/cc dir. Bu örneklerden elde edilen SIMS grafiği Şekil 4.2’de görülmektedir.

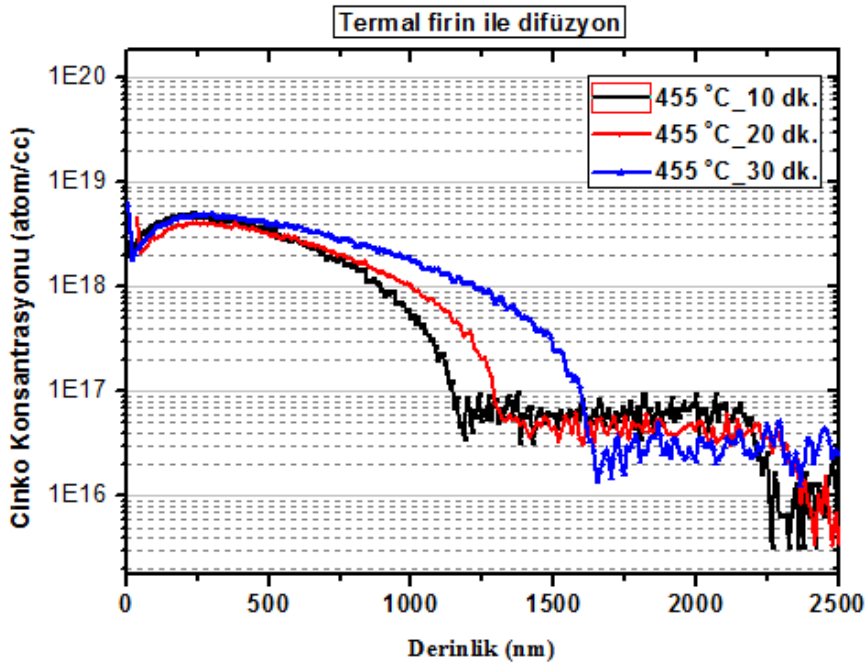


Şekil 4.2. Farklı sıcaklıklar için SIMS analizi

Bu örneklerin SIMS analizinde beklenildiği gibi sıcaklık arttıkça difüzyon derinliği artmıştır.  $D = D_0 e^{-E_a/kT}$  ifadesinde sıcaklık (T) arttığı zaman difüzyon sabiti artmaktadır. Difüzyon sabiti  $D=x^2/t$  ile ifade edildiğinden, süre sabit tutulduğu zaman difüzyon sabiti arttığı zaman p-n eklem bölgesinin derinliği de artmaktadır. Şekil 4.2’de sıcaklık arttıkça p-n eklem bölgesinin derinliğinin arttığı görülmektedir.

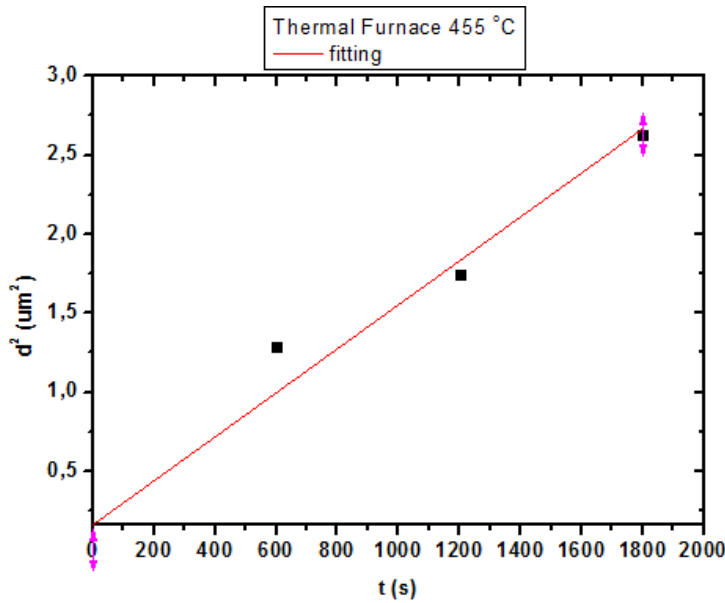
#### 4.1.2. Sabit sıcaklık - Farklı süre

Bu aşamada örnekler sabit sıcaklıkta farklı sürelerde difüzyon yapılmıştır. Süreler 10, 20 ve 30 dk. olarak ayarlanmıştır. Bunun nedeni o sıcaklık için difüzyon katsayısını elde edebilmektedir.



Şekil 4.3. Farklı süreler için SIMS analizi

Şekil 4.3’de görüldüğü gibi difüzyon derinlikleri sırasıyla 1130 nm, 1320 nm ve 1620 nm elde edilmiştir. Bu analizde de beklendiği gibi aynı sıcaklıkta süre uzadıkça difüzyon derinliğinin arttığı görülmüştür. Difüzyon katsayısı, sıcaklık sabit tutulduğu zaman aynı kalmaktadır. Sıcaklık sabit tutulduğunda yani difüzyon katsayısı aynı kaldığında,  $D=x^2/t$  ifadesine göre süre arttıkça p-n eklem bölgesinin derinliği de artmaktadır. Şekil 4.3’de bu beklenen davranış ile uyumlu sonuçlar görülmektedir.



Şekil 4.4. 455 °C için  $d^2$ -t grafiği



Şekil 4.4’de 455 °C için difüzyon derinliğinin karesine karşı difüzyon süresi grafiğini göstermektedir. Difüzyon derinliğinin sürenin kare köküyle doğrusal arttığı gözlenmiştir. Literatürdeki difüzyon çalışmalarında da bu davranış gözlenmektedir. Siyah noktalar deneysel sonuçları, kırmızı çizgi ise fit yapılmış halini göstermektedir. Grafikleri çizimi ve fit yapma işlemi Originpro 8 programı kullanılarak yapılmıştır. Literatürde bu fit doğrusunun eğimi en basitleşmiş şekilde difüzyon sabitini vermektedir.

$$\frac{x^2}{t} = 0,00139 \mu^2/s \quad (4.1)$$

Sabit yüzey konsantrasyonu ile difüzyon için, derinliğin bir fonksiyonu olarak bir hole yoğunluğu tamamlayıcı bir hata fonksiyonu olarak davranır.

$$C(x, t) = C_s \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (4.2)$$

Yüksek taşıyıcı konsantrasyonlarında difüzyon dışsal olur.

$$D = x^2 / \{ [2\operatorname{erfc}^{-1}(C_b/C_s)]^2 \cdot t \} \quad (4.3)$$

$C_b$  temel elektron konsantrasyonudur.

Üç farklı difüzyon sıcaklık 435, 440 ve 455 °C için difüzyon sabiti sırasıyla  $8,06 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{s}$ ,  $9,83 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{s}$  ve  $1,29 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$

Bu sonuçlarda difüzyon sıcaklığı arttıkça difüzyon sabitinin arttığı görülmektedir ve bu davranış literatür ile uyumludur.

#### Aktivasyon enerjisi

InP malzemesine çinko difüzyonu için; difüzyon sabitini sıcaklığa bağımlılığı Arrhenius eşitliği ile ifade edilir.

$$D = D_0 e^{-E_a/kT} \quad (4.4)$$

Burada  $E_a$  difüzyon mekanizmasına bağlı aktivasyon enerjisidir. Eş. 4.4 doğal logaritması alındığında

$$\ln D = \ln D_0 - \frac{E_a}{kT} \quad (4.5)$$

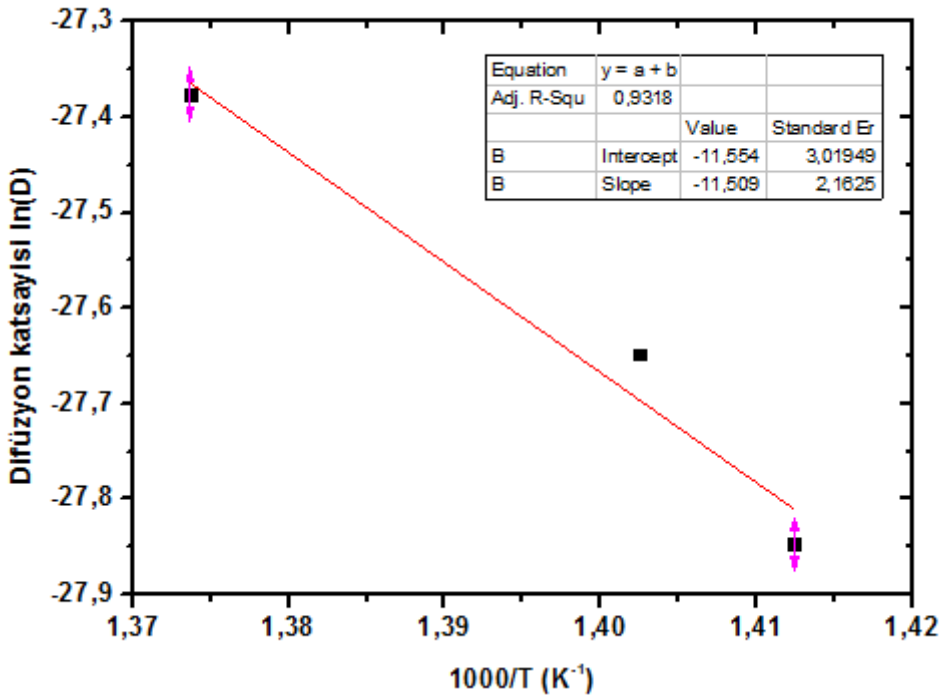
Elde edilecektir. 10 tabanına göre ifade düzenlenirse 4.6 eşitliği elde edilir.

$$\log D = \log D_0 - \frac{E_a}{2.303kT} \quad (4.6)$$

$D_0$ ,  $E_a$  ve  $k$  büyüklükleri sabit olduğundan, eş. 4.7 bir doğru denklemi formunu alacaktır.

$$y = b + mx \quad (4.7)$$

Bu denklem için  $y$  ve  $x$ , sırasıyla  $\ln D$  ve  $1/T$  değişkenlerine benzemektedir. Dolayısıyla, mutlak sıcaklığın çarpmaya göre tersine bağlı olarak  $\ln D$ 'nin değişimi çizilirse, eğimi ve kesişim noktası sırasıyla,  $-E_a/k$  ve  $\ln D_0$  olan doğruyu vermelidir. Bu, aslında deneysel olarak  $E_a$  ve  $D_0$  büyüklüklerinin deneysel olarak belirlenmesinde izlenen yoldur.  $k=8.617E-5 \text{ eV/}^\circ\text{K}$

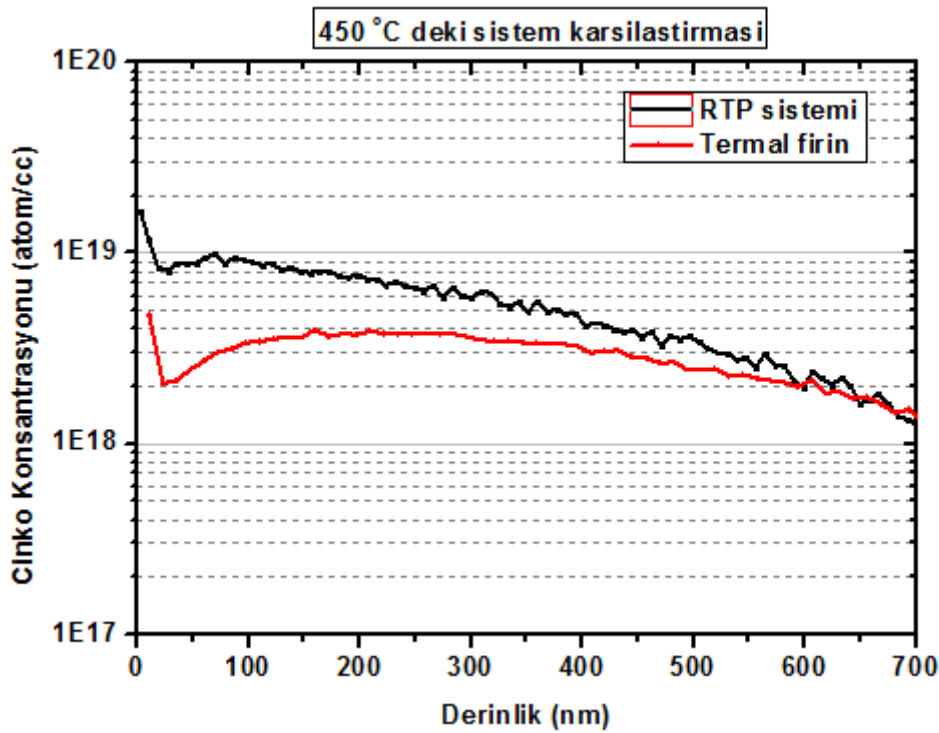


Şekil 4.5. Difüzyon katsayısına-1000/T grafiği

Bu yöntem ile gerçekleştirilen difüzyonun aktivasyon enerjisi 0,99 eV elde edilmektedir. Bu literatürdeki değerlerle uyumludur ve difüzyon mekanizmasının arayer-yeralan şeklinde gerçekleştiğini göstermektedir.

#### 4.1.3. Sabit sıcaklık-Farklı sistem

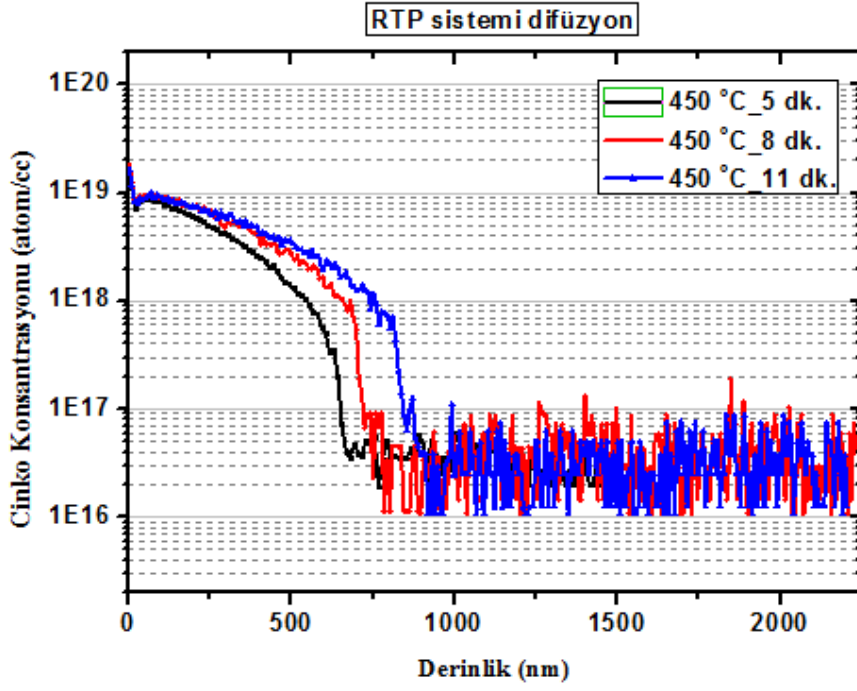
Bu bölümde termal fırın ile RTA sistemi karşılaştırması yapılmıştır. Aynı sıcaklıkta aynı difüzyon derinliğinde iki sistem için elde edilen çinko konsantrasyonu Şekil 4.6'da görüldüğü gibidir. RTA sisteminde konsantrasyon  $8,19 \times 10^{18}$  atom/cc iken difüzyon fırınında  $3,47 \times 10^{18}$  atom/cc dir. Termal fırında yavaş bir şekilde ısınması ve soğumasına karşın RTA sisteminde örnekler 2 dk. da istenilen sıcaklığa çıkıyor ve 1 dk. dan daha az bir sürede oda sıcaklığına inebiliyor. RTA sisteminin, termal fırına göre en önemli avantajı difüzyonun gerçekleştiği termal denge sıcaklığına ulaşma süresinin çok kısa olmasıdır.



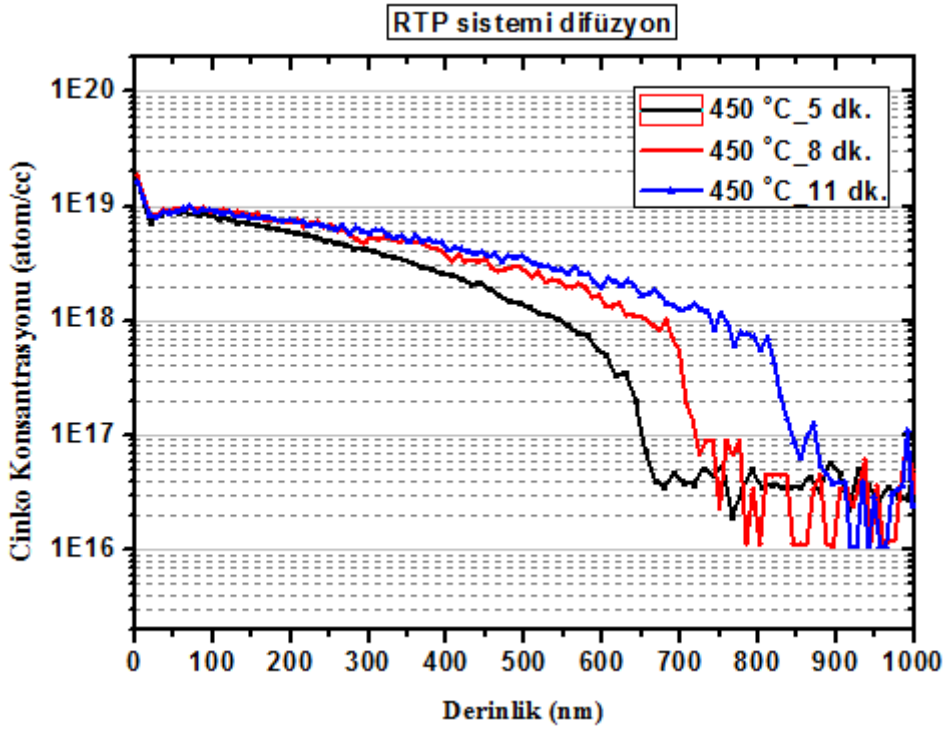
Şekil 4.6. RTA ile Termal fırın karşılaştırılması

#### 4.1.4. Sabit sıcaklık-Farklı süre (RTA)

RTA sisteminde elde edilen yüksek Zn konsantrasyon sonucu bu sistemde sabit sıcaklık değerinde farklı sürelerde difüzyon yapılmıştır. Difüzyon parametreleri 450 °C'de 5 dk. , 8 dk. ve 11 dk. olacak şekilde ayarlanmıştır. Şekil 4.7 'de görüldüğü gibi difüzyon derinliği sırasıyla 640 nm, 715 nm ve 840 nm dir. Şekil 4.8'de derinlik boyutu daha küçülterek çizdirilmiştir.

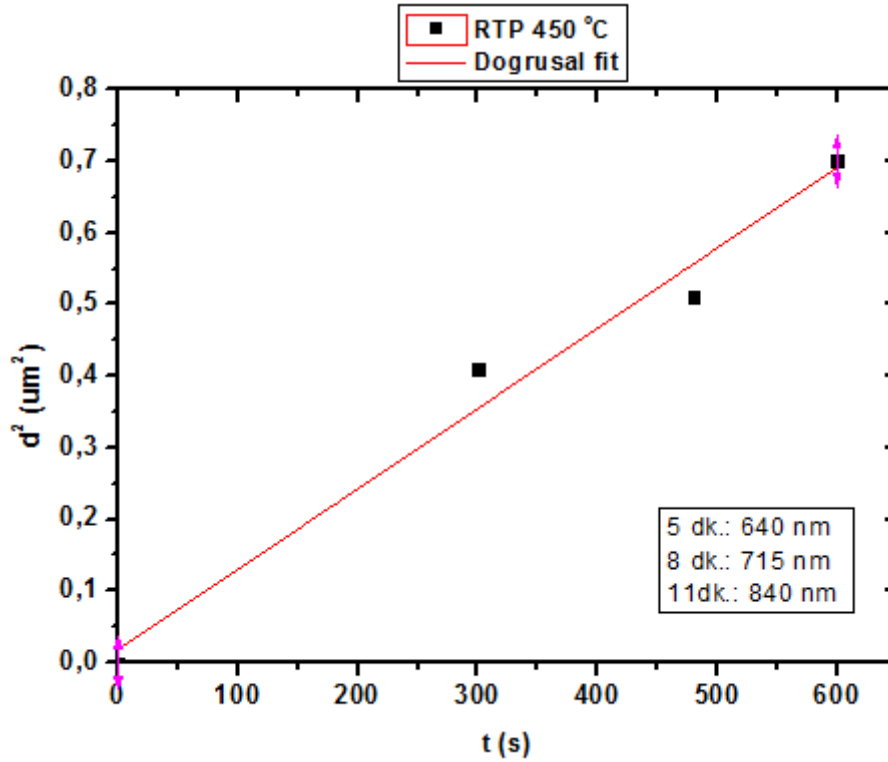


Şekil 4.7. RTA farklı süre-SIMS grafiği 1



Şekil 4.8. RTA farklı süre-SIMS grafiği 2

Beklenildiği gibi difüzyon derinliğinin sürenin kare köküyle doğru oranda arttığı gözlenmiştir.



Şekil 4.9. 450 °C için  $d^2$ -t grafiği

Şekil 4.9’de 450 °C için difüzyon derinliğinin karesine karşı difüzyon süresi grafiğini göstermektedir. Difüzyon derinliğinin sürenin kare köküyle doğrusal arttığı gözlenmiştir. Literatürdeki difüzyon çalışmalarında da bu davranış gözlenmektedir. Siyah noktalar deneysel sonuçları, kırmızı çizgi ise fit yapılmış halini göstermektedir. Bu grafikten elde edilen eğim;

$$\frac{x^2}{t} = 0,00124 \mu^2/s \quad (4.8)$$

Yukarıda bahsedilen hesaplar kullanılarak difüzyon katsayısı  $3,52 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$  elde edilmiştir.

## 4.2. Elektriksel Ölçümler

Bu çalışmada çinko katkılanan InP örneklerin “ECOPIA 3000” hall ölçüm sistemi kullanılarak elektriksel ölçümleri yapılmıştır. Bu sistemle taşıyıcı konsantrasyonu, Hall mobilitesi, direnci, tabaka konsantrasyonu ve iletkenliği de hesaplanmıştır. Örnek yüzeyi kuru aşındırma yöntemi ile aşındırılarak tabaka konsantrasyonuna ve iletkenliğe olan etkisi araştırılmıştır.

### 4.2.1. Hall ölçümü

Van der Pauw metodu örneklerin hall ve iletkenliği ölçmek için kullanılan yaygın bir yöntemdir. Bu yöntem 1958 yılında Leo J. van der Pauw tarafından bulunmuştur.

Bu ölçüm metodu ile malzemenin aşağıdaki özellikleri ölçülebilmektedir.

- Malzemenin direncini
- Katkılama tipini (p-tipi, n-tipi)
- Çoğunluk taşıyıcıların tabaka taşıyıcı yoğunluğu (birim alandaki çoğunluk taşıyıcı yoğunluğu) buradan katkılama seviyesi bulunabiliyor.
- Çoğunluk taşıyıcılarının mobilitesi

Bir p-tipi yarıiletkenin Hall olayı ölçüm düzeneği Şekil 4.10'da görülmektedir. Bu düzende, x-doğrultusunda elektrik alan, z-doğrultusunda manyetik alan uygulanıp y-doğrultusunda (yarıiletkenin alt ve üst yüzeyinden)  $V_H$  Hall voltajı okunmaktadır. Bu ölçülebilen gerilimin varlığı 1879'da E. H. Hall tarafından keşfedilmesinden sonra Hall etkisi olarak adlandırılmıştır. x-doğrultusunda (elektrik alan doğrultusu) hareket eden holelere manyetik alan yukarı yönde (-y doğrultusu) bir Lorentz kuvveti uygular. Lorentz kuvvetinin etkisiyle, yarıiletkenin üst yüzeyinde pozitif yük birikimi alt yüzeyinde ise negatif yük birikimi oluşur. Malzemenin kenarlarındaki yük artışı, bu manyetik etkiyi dengeler ve malzemenin iki kenarı arasında ölçülebilen bir gerilime neden olur. Denge durumunda y-doğrultusunda herhangi bir akım oluşmayacağından Hall alanından kaynaklanan elektrostatik kuvvet Lorentz kuvvetiyle dengelenir:

$$\vec{F}_L = q\vec{v} \times \vec{B} = q v \hat{x} \times B \hat{k} = -qvB \hat{j} \quad (4.9)$$

$$-q v_x B_z \hat{j} + q E_y \hat{j} = 0 \quad (4.10)$$

$$E_y = v_x B_z \quad (4.11)$$

Yarıiletken içinde oluşan bu alana Hall alanı ve alanın oluşumuna Hall etkisi veya Hall olayı denir[36, 37]. Burada  $E_y$  hall alanını,  $q$  parçacığın yükü (coulombs),  $v$  parçacığın hızı (cm/s), and  $B$  manyetik alan kuvveti (Wb/cm<sup>2</sup>) dir.  $V_H$  gerilimi de Hall gerilimi olarak adlandırılır.

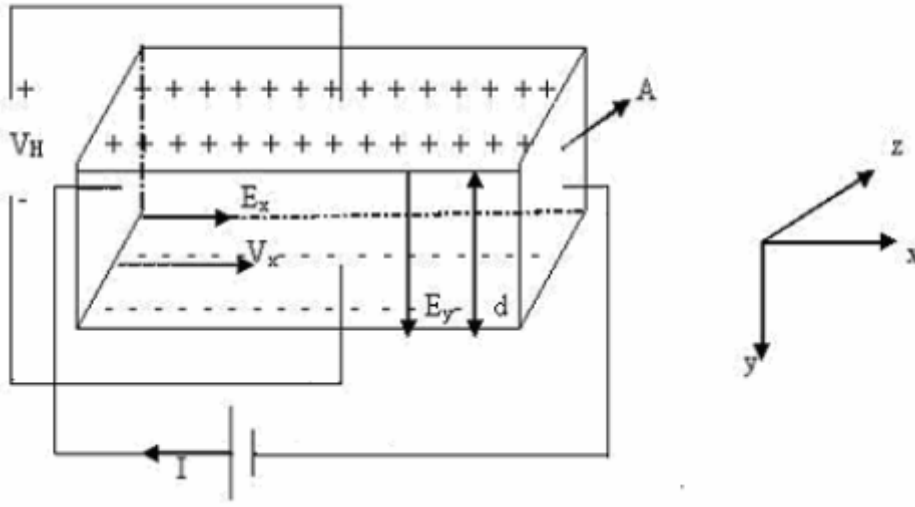
$$V_H = E_y d = v_x B_z d \quad (4.12)$$

$$v_x = \frac{I}{nAq} \quad (4.13)$$

$$n = \frac{IB}{qV_H d} \quad (4.14)$$

Burada  $n$  çoğunluk taşıyıcıların tabaka taşıyıcı yoğunluğu,  $A$  malzemenin kesit alanıdır.

Sonuç olarak; taşıyıcı tipi ve yoğunluğu ve öz direnç Hall etkisi ölçümlerinden doğrudan belirlenir[38, 39].



Şekil 4.10. Hall ölçümü

#### Malzeme Direnci:

Yarı iletken malzemenin direnci aşağıdaki gibi ifade edilir.

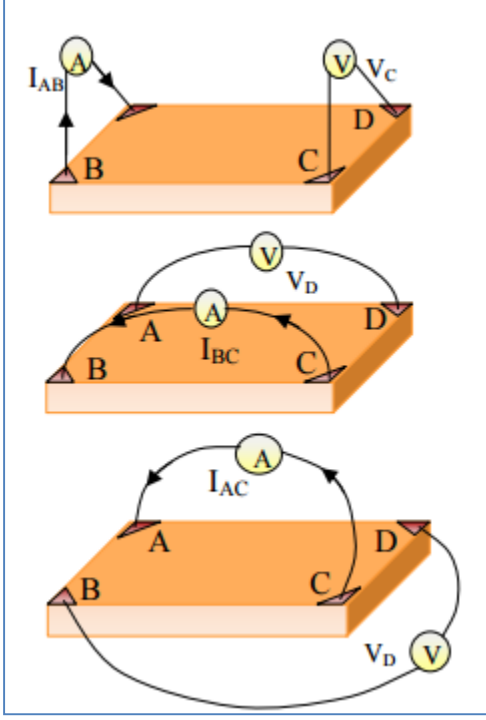
$$\rho = \frac{1}{q(n\mu_n + p\mu_p)} \quad (4.15)$$

$n$  ve  $p$  sırasıyla malzemedeki elektron ve hole konsantrasyonlarıdır.  $\mu_e$  ve  $\mu_p$  elektron ve hole mobilitesidir. Genellikle, malzeme yeteri kadar katkılandırıldığında yani konsantrasyon olarak birkaç derece fark var ise bu eşitlik basitleştirilerek;

$$\rho = \frac{1}{q(n_m\mu_m)} \quad (4.16)$$

$n_m$  ve  $\mu_m$  sırasıyla çoğunluk taşıyıcısının katkılama seviyesi ve mobilitesidir. Bu eşitlikten anlaşılacağı gibi katkılama miktarı arttıkça malzemenin direnci azalmaktadır.

Van der Pauw metodunda kontakların ikisine akım uygulanırken diğer iki kontak arasındaki potansiyel fark ölçülür.



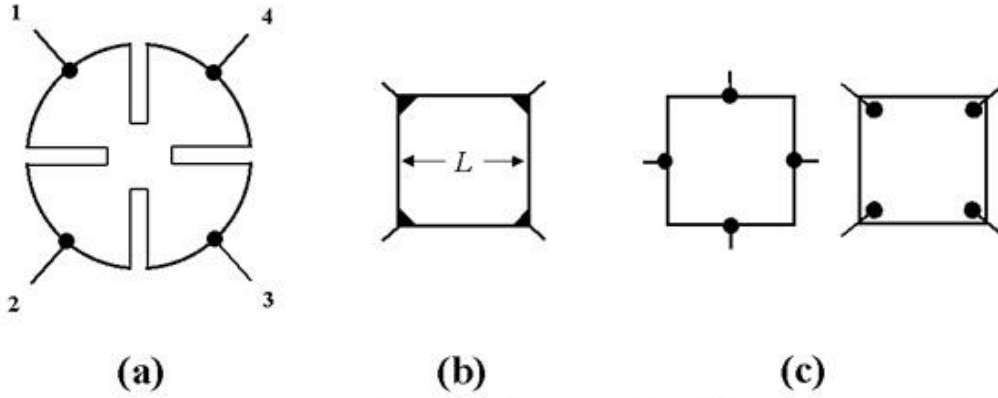
Şekil 4.11. Van der Pauw metodu

#### 4.2.2. Örnek hazırlama

Bu teknik ile düzgün sonuç alabilmek için 5 koşul bulunmaktadır.

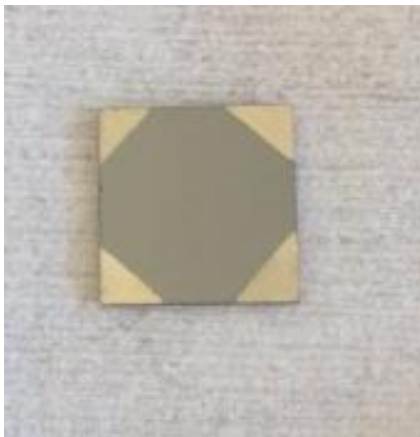
- Örneğin yüzeyi her yerde eşit olmalıdır.
- Örnekte herhangi bir isole edilmiş bölge olmamalıdır.
- Örnek homojen olmalıdır.
- 4 kontak örneğin köşesinde olmalıdır.
- Kontakların boyutları örneğin kalan alanından küçük olmalıdır.





Şekil 4.12. Hall ölçümü için örnek şekilleri[40]

Ölçümün gerçekleşebilmesi için örnek üzerinde 4 ohmik kontak bulunmalıdır. Çinko katkılanmış InP örnekler Termal buharlaştırma yöntemiyle 4 köşesinde kontak olacak şekilde maskelenerek metal kaplanır. Örnek üzerine Altın (Au), Çinko(Zn) ve son olarak Altın (Au) metali buharlaştırılır [41, 42] . Bu metaller, çinko difüzyonu yapılmış InP yüzeyinde düşük öz dirençli p kontakları oluştururlar. Yüksek kontak direnci fototaşyıcıların toplanmasına direnç oluşturmaktadır. Kaplanan metallerin ohmik özellik kazanmalarını sağlamak için örnek, RTA cihazında forming gaz (%5 H<sub>2</sub> + %95 N<sub>2</sub>) atmosferinde 400 °C’de 30 saniye tavllanır. Bu tavlama adımı ile kaplanan metallerin hem kendi aralarında hem de epitaksiyel malzeme ile alaşım oluşturarak ohmik özellik kazanması amaçlanmaktadır.



4.13. Hall ölçümü için hazırlanan örnek

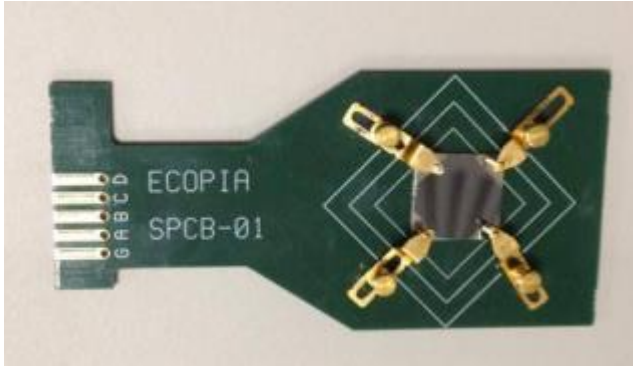
Bu çalışmada üretilen ince filmlerin “Hall Effect Measurement System HMS-3000 Manual Ver 3.5” sistemi kullanılarak elektriksel ölçümleri yapılmıştır (Şekil 4.14). Difüzyon

yapılmamış ve difüzyon yapılmış örneklerin ölçümü yapılmıştır. 4 noktadan kontak alınan örnek sisteme tutucu yardımıyla yerleştirilir. Şekil 4.15’de örnek tutucu görülmektedir.



Şekil 4.14. Hall ölçüm sistemi

Bu tutucuya iki kutuplu elektromanyetik parça ile manyetik alan uygulanır. Bilgisayar programına büyüklüğü ve yönü bilinen bu manyetik alan verileri girilerek örneğin ölçümleri alınır (Şekil 4.16).



Şekil 4.15. Hall sistemi örnek tutucu

ECOPIA HALL EFFECT MEASUREMENT SYSTEM (HMS-3000 VER 3.51.5)

## HALL EFFECT MEASUREMENT SYSTEM

**INPUT VALUE**

DATE: 08-27-2015    USER NAME: Dogan

SAMPLE NAME: InP-Bare    COM PORT: COM5    TEMP: 300K

I = 50.00 nA    DELAY = 0.100 [S]

D = 2.000 [um]    B = 0.570 [T]

Measurement Number = 1000 [Times]

**MEASUREMENT DATA**

AB [mV]	BC [mV]	AC [mV]	MAC [mV]	-MAC [mV]
-999.460	-4158.110	-420.311	3696.330	3805.480
4606.940	2992.570	-1694.980	581.811	-168.694
CD [mV]	DA [mV]	ED [mV]	MBD [mV]	-MBD [mV]
-999.460	-4206.610	-2270.690	4217.890	3871.190
3832.150	4368.600	1651.120	325.635	995.483

**RESULT**

Bulk concentration = -3.793E+11 [ / cm <sup>3</sup> ]	Sheet Concentration = -7.586E+7 [ / cm <sup>2</sup> ]
Mobility = 2.982E+2 [ cm <sup>2</sup> / Vs ]	Conductivity = 1.812E-5 [ 1/Ω cm ]
Resistivity = 5.520E+4 [ Ω cm ]	Average Hall Coefficient = -1.646E+7 [ cm <sup>3</sup> / C ]
A-C Cross Hall Coefficient = -1.508E+7 [ cm <sup>3</sup> / C ]	B-D Cross Hall Coefficient = -1.783E+7 [ cm <sup>3</sup> / C ]
Magneto-Resistance = 6.689E+7 [ Ω ]	Ratio of Vertical / Horizontal = 6.737E-1

OPERATING DESCRIPTION: The calculation is completed.    PROGRESS [%]: 100

[GoTo IV CURVE](#)

[COM.TEST](#)   [MEASURE](#)   [STOP](#)   [CLEAR](#)   [CALCUL](#)   [LOAD](#)   [SAVE](#)   [PRINT](#)   [CLOSE](#)   [HELP](#)

Şekil 4.16. Bilgisayar yardımıyla alınan ölçüm

Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi çinko difüzyonu yapılmamış yalın örnek için tabaka konsantrasyonu  $7,30 \times 10^{+7}$   $1/\text{cm}^2$  ve iletkenlik  $1,85 \times 10^{-5}$   $1/\Omega \cdot \text{cm}$  olarak ölçülmüştür. İletkenlik değeri alttaşın direnç değeri olan  $> 10^7$  ohm.cm değeri ile uyumludur.

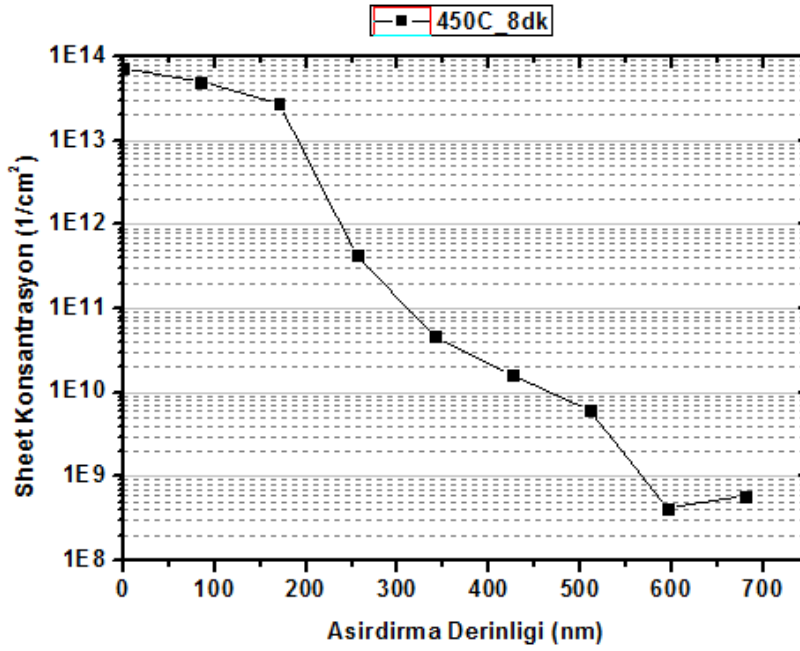
Hall ölçümü ile 2 farklı örneğin testleri yapılmıştır. Bu örneklerin difüzyon işlemi RTA sisteminde yapılmıştır. F1 örneği  $450 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 8 dk., F2 örneği ise  $450 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 11 dk. difüzyon yapılmıştır. Sırasıyla tabaka konsantrasyonu  $7,31 \times 10^{+13}$  ve  $1,39 \times 10^{+14}$   $1/\text{cm}^2$  ölçülmüştür. Örneklerin iletkenlikleri 11,61 ve 13,12  $1/\Omega \cdot \text{cm}$  ölçülmüştür. Taşıyıcı sayısının artmasından dolayı da hole mobilitesinde azalma görülmüştür.

Çizelge 4.1. Örneklerin hall ölçümü karşılaştırması

	Yalın InP	450 °C_8dk	450 °C_11 dk
Tabaka Konsantrasyonu (1/cm <sup>2</sup> )	$7,30 \times 10^{+7}$	$7,31 \times 10^{+13}$	$1,39 \times 10^{+14}$
İletkenlik (1/Ωcm)	$1,85 \times 10^{-5}$	11,61	13,12
Özdirenç (Ω.cm)	$5,38 \times 10^{+4}$	$9,65 \times 10^{-2}$	$7,82 \times 10^{-2}$

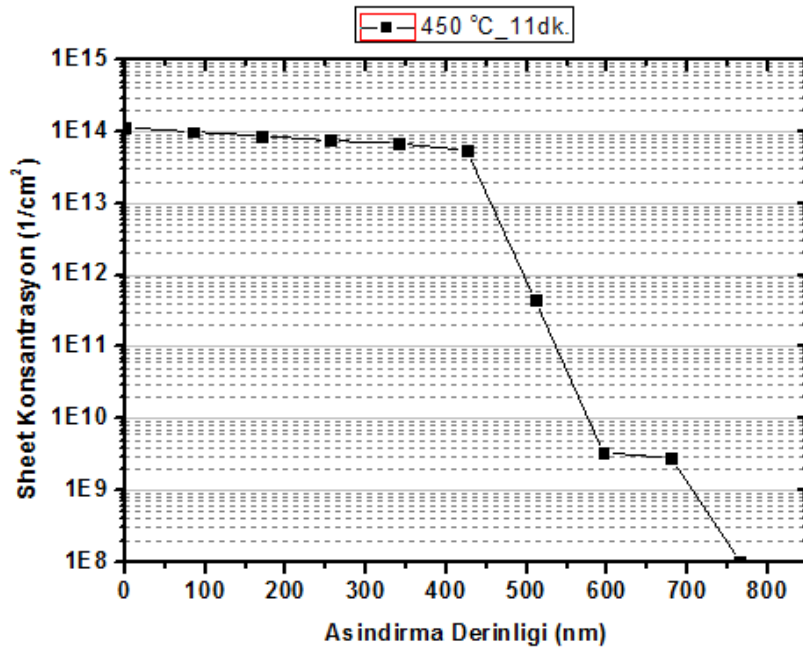
Örnekler ICP-RIE sistemi ile kademeli olarak aşındırılarak tabaka konsantrasyon ve iletkenlik değişimi ölçülmüştür.

F1 örneği 450 °C da 8 dk. difüzyon yapılmıştır. Şekil 4.17’de görüldüğü gibi örneğin tabaka konsantrasyonu 570 nm civarında yalın örneğin seviyesine inmiştir. SIMS analizinde aynı örnek için 715 nm’de difüzyonun sonlandığı görülmüştür. Burada oluşan fark Zn atomlarının hepsinin elektriksel olarak katkıda bulunmamasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.17. Tabaka konsantrasyon-derinlik grafiği (450 °C\_8dk.)

F2 örneği ise 450 °C’de 11 dk. difüzyon yapılmıştır. Bu örneğin SIMS analizinde 840 nm de çinko atomlarının gürültü seviyesine indiği görülmüştür. Tabaka konsantrasyon grafiğinde ise 760 nm derinlikten sonra örnekteki elektriksel aktif taşıyıcılardan alınan katkının en alt seviyeye indiği gözlenmiştir. Bu fark gene katkılanan her atomun elektriksel olarak aktif olmamasından kaynaklanmaktadır (Şekil 4.18).



Şekil 4.18. Tabaka konsantrasyon-derinlik grafiği (450 °C\_11dk.)

Çizelge 4.2 ve çizelge 4.3’de iki örnek için derinliğe bağlı iletkenlik tabloları görülmektedir. Aynı şekilde F1 örneği 570 nm, F2 örneği 760 nm derinliğinde iletkenlik olarak yalın örnek seviyesine inmektedir.

Çizelge 4.2. F1 ve F2 örnekleri için aşındırma derinliği-iletkenlik

Aşındırma derinliği (nm)	İletkenlik ( $\sigma$ , 1/Ωcm)	
	F1	F2
0	11,61	13,15
95	10,96	13,91
190	9,39	13,57
285	3,60	12,30
380	0,307	8,63
475	0,06	6,62
570	6,08E-4	0,0076
665	2,67E-4	0,00281
760	6,05E-6	3,33E-4

### 4.2.3. Çinko aktivasyon yüzdesi;

Çinko aktivasyonu, hall ölçümü ve SIMS profillerinden hesaplanabilmektedir. Hall ölçümü difüzyon öncesi ve sonrası tabaka hole konsantrasyonunu vermektedir. Difüzyon sonrası hole konsantrasyonunun artış InP kafes içerisine difüz eden, elektriksel olarak aktif çinko atomlarından dolayıdır. SIMS ise örnek içerisindeki çinko atomlarını ve toplam çinko dozunu hesaplanmasına izin vermektedir [43].

$[Zn]_{toplam}$  , Örnek içerisindeki çinko atomlarının toplam konsantrasyonunu ifade etmektedir. Örnekler için toplam atom sayısı için SIMSview programı ile doğrudan hesaplanmaktadır.

$$[Zn]_{Toplam} = \int_{x=0}^{Derinlik} [Zn(x)] dx \quad (4.17)$$

$\Delta [Hole]$ , difüzyon sonrası değişen hole konsantrasyonunu ifade etmektedir. RTP öncesi  $10^7$  atom/cm<sup>2</sup>

$$\Delta [Hole] = [Hole]_{RTPsonrası} - [Hole]_{RTPöncesi} \quad (4.18)$$

Elektriksel olarak aktif çinko atomları yüzde olarak;

$$Aktivasyon = \frac{\Delta [Hole]}{[Zn]_{Toplam}} \times 100 \quad (4.19)$$

Çizelge 4.3'de görüldüğü gibi elektriksel olarak aktif çinko atomları sırasıyla % 22,6 ve 35,7 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.3. Çinko elektriksel aktiflik tablosu

Örnek no:	Sıcaklık (°C)	Süre (saniye)	$\Delta [Hole]$ (cm <sup>-2</sup> )	$[Zn]_{Toplam}$ (cm <sup>-2</sup> )	Zn aktivasyon (%)
F1	450	480	$7,31 \times 10^{13}$	$3,23 \times 10^{14}$	22,6
F2	450	660	$1,39 \times 10^{14}$	$3,89 \times 10^{14}$	35,7

## 5. YORUM

Bu tez çalışmasında InP yarıiletken malzemesine p tipi difüzyon gerçekleştirilmiştir. Bu difüzyon çalışmaları için Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezinin ve Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezinin alt yapıları kullanılmıştır.

Alttaş olarak InP seçilmesinin amacı yüksek mobilite değerine sahip olmasıdır. Bu özelliği sayesinde bir çok fotodedektör uygulamalarında InP alttaş üzerine büyütülen epitaksiyel yapılar kullanılmaktadır. InP malzemesini katkılanmak için genellikle çinko atomları kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında öncelikle genel difüzyon modelleri, çinko atomunun difüzyonu ve bu fabrikasyonun araştırma ve geliştirme aşamaları gerçekleştirilmiştir. Fabrikasyon aşamasında öncelikle yalın InP alttaşları çinko atomu ile katkılanmaya çalışılmıştır. Sonra InP örnekler için difüzyon sıcaklığında deforme olmayan maske geliştirilmiştir. En son bölümde ise maskelenen InP örneklerin çinko difüzyonları üzerine denemeler yapılmıştır. Buradaki maskelemenin amacı tüm yüzeyin değil sadece istediğimiz bölgelere çinko atomlarını yerleştirmektir. Difüzyon karakterizasyonu için İkincil İyon Kütle Spektrometresi (SIMS) analiz ve Hall yöntemi kullanılmıştır.

Difüzyon çalışmaları farklı sıcaklıklarda termal fırın kullanılarak başlamıştır. Burada süre sabit kalacak şekilde farklı sıcaklıklarda difüzyon yapılmıştır. Literatür ile uyumlu bir şekilde sıcaklık arttığı zaman difüzyon derinliğini arttığı görülmüştür.

Sonraki çalışmada sıcaklık sabit tutularak süreler değiştirilerek difüzyon profilleri incelenmiştir. Literatür ile uyumlu bir şekilde süre arttığı zaman difüzyon derinliğini arttığı görülmüştür. Ayrıca elde edilen sonuçlar neticesinde difüzyon derinliğinin karesinin, zaman ile doğrusal olarak değiştiği görülmüştür. Difüzyon çalışmalarına sistem değiştirilerek devam edilmiştir. Bu aşamada difüzyonlar, hızlı termal tavlama sistemi ile yapılmıştır. Bu sisteme geçiş amacımız termal fırının dakikada sıcaklık artma hızının ( $^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ ) sınır değerlerinde olmasından dolayı istenilen sıcaklığa uzun sürede çıkabilmesidir. Hızlı termal tavlama sisteminde 2 dakika gibi bir sürede difüzyon sıcaklığına ulaşılırken, termal fırında bu süre en az 20 dakika olmaktadır. Aynı şartlar soğuma aşamasından da karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca RTA sistemiyle yapılan difüzyonlarda InP içerisine daha fazla çinko atomunun yerleştiği görülmüştür. RTA sistemiyle sıcaklık sabit tutularak değişik sürelerde difüzyon denemeleri yapılmıştır. SIMS analizinden elde edilen verilerde bu difüzyon içinde derinliğin karesi, süre ile doğrusal değişmektedir.

Difüzyon sonrası InP içerisine yerleştirilen çinko atomlarının elektrik ölçümü Hall yöntemi ile ölçülmüştür. Malzeme içerisindeki her atom elektriksel olarak aktif olmayabilir. Bu sebeple elektriksel ölçümler çok önemlidir. Difüzyonu yapılmış örneklerin tabaka konsantrasyon, iletkenlik, özdirenç ve taşıyıcı mobilite değerleri ölçülmüştür. Difüzyon yapılan örneklerde beklendiği gibi tabaka konsantrasyon ve iletkenlik değerleri artmış, direnç değerleri ise azalmıştır. Bu değerlerin yüzey kademeli bir şekilde aşındırılarak değişimi incelenmiş ve SIMS verileri ile uyumuna bakılmıştır. Genelde elektriksel olarak difüzyon derinliği, SIMS verilerinde elde edilenden daha azdır. Bu çinko atomlarının hepsinin elektriksel olarak katkıda bulunmadığı anlamına gelmektedir. Çinko atomlarının maksimum aktivasyon yüzdesi ise 450 °C’de 11 dakika difüzyon yapılan örnek için %35,7 elde edilmiştir.

SIMS analizinden yola çıkarak elde edilen aktivasyon enerjisi 0,99 eV hesaplanmıştır. Bu literatürdeki değerlerle uyumludur ve difüzyon mekanizmasının arayer-yeralan şeklinde gerçekleştiğini göstermektedir.

Gelecek için planlanan çalışmalarda örneklerin difüzyon profilini değiştirmeden elektriksel olarak aktif atom sayısını arttırmak ve bir fotodedektör performansına etkisi incelemektir.



## KAYNAKLAR

1. Mutlu, T. (2010). *Au/p-GaAs<sub>1-x</sub>Px/n-GaAs Yapılı P-N Eklem Diyodun Tavlama Sıcaklığına göre Elektriksel Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Balıkesir.
2. Wilson, J., and Hawkes, J. B. (2000). *Optoelektronik (Çev. İ. Okur)*. Adapazarı: Değişim Yayınları. (Eserin orijinali 1989'da yayımlandı), 41-53, 68-77.
3. Neamen, D. A. (2003). *Semiconductor Physics and Devices* (Third edition). University of New Mexico: McGraw-Hill Higher-Education, 3-9.
4. Yu, P., and Cardona, M. (2010). *Fundamentals of Semiconductors Physics and Materials Properties* (Fourth Edition). Berlin: Springer-Verlag, 71-73.
5. Plummer, J. D., Deal M. D., and Griffin P. B. (2000). *Silicon VLSI Technology Fundamentals, Practices, and Modeling* (First Edition). Prentice Hall Electronics and VLSI Series, 9-29.
6. Xiao, H. (2001). *Introduction to Semiconductor Manufacturing Technology* (Second Edition). Pearson Prentice Hall, 59-63.
7. Askeland, D. R. (1998). *Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri (Çev. M. Erdoğan)*. İstanbul: Nobel Yayın Dağıtım. (Eserin orijinali 1994'de yayımlandı), 55-59.
8. İnternet: Indium Phosphide. wikipedia.  
URL:[http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fen.wikipedia.org%2Fwiki%2FIndium\\_phosphide&date=2015-12-01](http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fen.wikipedia.org%2Fwiki%2FIndium_phosphide&date=2015-12-01). Son erişim tarihi: 01.12.2015
9. Tuck, B. (1988). *Atomic Diffusion in III-V Semiconductors* (Third edition). Bristol and Philadelphia: Adam Hilger, 75-112.
10. Linfu, Z. (1997). *Study of Zinc Diffusion In InP-based Semiconductor Using Spin-on Film and RTA Process*, Master's Thesis, National Taipei University Department of Electro-Optical Engineering, Taipei.
11. Wang, X. D., Hu, W. D., Chen, X.S., Lu, W., Tang, H. J., Li, T. and Gong H. M. (2008). Dark Current Simulation of InP/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP p-i-n Photodiode. *Optical and Quantum Electronics*, 40(1261).
12. Bin L., Huai-Wei, Y., Qiang, G., Xiao-Hong Y., Wang, J., Xiu-Ping, W., Liu Shao-Qing and Qin, H. (2012). Ultra Low Dark Current, High Responsivity and Thin Multiplication Region in InGaAs/InP Avalanche Photodiodes. *China Physics Letter*, 29(11).
13. ChunQuan, Z. (2005). *Research on Zinc Diffusion in undoped InP*. Paper presented at Detectors and Associated Signal Processing II, Shanghai, China.
14. Pitts, O. J., Hisko, M., Benyon, W., and A.J. Spring Thorpe, A.J. (2012). *MOCVD Based Zinc diffusion Process for Planar InP/InGaAs Avalanche Photodiodes*

- Fabrication*. Paper presented at Indium Phosphide and Related Materials (IPRM), International Conference on. 2012, IEEE: Santa Barbara, CA. 225 - 228.
15. DURLU, T. N. (1996). *Katihal Fiziğine Giriş*. (Üçüncü Baskı). Ankara: Bilim Yayınları, 142-146.
  16. Gupta, D. (2005). *Diffusion Processes in Advanced Technology Materials*. New York. U.S.A.: William Andrew, 153-157.
  17. Lee, J. Y. (2003). *Rapid Thermal Processing of Silicon Solar Cells - Passivation and Diffusion*, Doctoral dissertation, University of Freiburg, Institut für Solare Energiesysteme. Freiburg.
  18. Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion*. (Second edition), OXFORD: Clarendon Press, 11-26.
  19. Shewmon, P. (1989). *Diffusion in Solids*. (Second edition). The Minerals, Metals&Materials Society, Warrendale, USA, 10-14, 54-68.
  20. İnternet: City University of Hong Kong, Chapter 8: Diffusion.  
 URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fpersonal.cityu.edu.hk%2F%7Eappkchu%2FAP4120%2F8.PDF&date=2015-12-01>. Son Erişim Tarihi: 01.12.2015
  21. Schmitt, F., Su, L. M., Franke D., and Kaumanns R. (1984). *A New Open Diffusion Technique Using Evaporated Zn<sub>3</sub>P<sub>2</sub> and Its Application to a Lateral p-n-p Transistor*. published at IEEE Transactions on Electron Devices, ED-31.
  22. Andrievskii, V. F., Gushchinskaya, E. V., Malyshev, S. A., (2003). Diffusion of Zinc into InP with an Unprotected Surface. *Semiconductors Journal*, volume:38, p. 68-71.
  23. Höglund, A., Castleton C. W. M., and Mirbt, S., (2008). Diffusion mechanism of Zn in InP and GaP from first principle. *The American Physical Society*, volume:77.
  24. Kazmierski, K., Huber, A. M., Morillot G., and Cremoux B. (1984). The Temperature-Dependent Diffusion Mechanism of Zn in InP Using the Semiclosed Diffusion Method. *Japanese Journal of Applied Physics*, volume: 23(5), p. 628-633.
  25. Matsumoto, Y. (1983). Diffusion of Cd and Zn into InP and InGaAsP (E<sub>g</sub>=0.95-1.35 eV). *Japanese Journal of Applied Physics*, volume: 22(11), p. 1699-1704.
  26. Van Gorp, G. J., van Dongen, T., Fontijn, G. M., Jacobs, J. M., and Tjaden, D. L. A., (1989). Interstitial and substitutional Zn in InP and InGaAsP. *Journal of Applied Physics*, Volume 65, Issue 553.
  27. Elsayed, M. (2011). *The Appearance of Vacancies during Cu and Zn Diffusion in III-V Compound Semiconductors*, Doctoral dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
  28. Arnold, N., Schmitt, R., and Heime, K. (1983). Diffusion in III-V semiconductors from spin-on film sources. *Japanese Journal of Applied Physics*, Volume:17 p. 443-474.

29. Jakiela, R., Barcz, A., Wenger, E., and Zagojski, A., (2005). Diffusion and activation of Zn implanted into InP:S. *Elvesier*, volume:78(2-4), p. 417-422.
30. Aytac, S. and Schlachetzki A. (1980). Shallow and Selective Diffusion of Zinc in Indium Phosphide. *Solid State Electronics* volume: 24, p. 57-61.
31. Schade, U. and Enders, P., (1992). Rapid Thermal Processing of Zinc Diffusion in Indium Phosphide. *Semiconductor Science and Technology*, volume: 7, p. 752-757.
32. Seung-Yeul, Y., Yoo, J. (2000). Characteristics of Zn diffusion in planar and patterned InP substrate using Zn<sub>3</sub>P<sub>2</sub> film and rapid thermal annealing process. *Surface & Coatings Technology*, 131, p. 66-69.
33. Kızılkaya, K. (2012). *InGaAs/InP ve InGaAs/GaAs Kuantum Kuyulu Güneş Hücrelerinin Üretimi ve Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
34. İnternet: Evans Analytical Group, SIMS Theory, Ion Beam sputtering. URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.eag.com%2Fmc%2Fsims-ion-beam-sputtering.html%23next&date=2015-12-01>, Son Erişim Tarihi: 01.12.2015
35. İnternet: Evans Analytical Group, SIMS Theory, Sputtering Effects. URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.eag.com%2Fmc%2Fsims-sputtering-effects.html%23next&date=2015-12-01>, Son Erişim Tarihi: 01.12.2015
36. Özdemir, R. (2010). *Elektrodepolama Yöntemi İle Elde Edilen ZnFe İnce Filmlerinin Elektriksel Öz direnç Özelliklerinin Sezgisel Yöntemler Yardımıyla İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Kilis 7 Aralık Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı. Kilis.
37. Çelik, Y. (2005). *Kimyasal Yöntemle Büyütülen Çinko Oksit İnce Filmlerin Yapısal, Optiksel ve Elektriksel Özelliklerin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara Üniversitesi: Ankara.
38. Yanış, H. (2008). *Atmalı Filtreli Katodik Vakum Ark Depolama Yöntemiyle p-tipi çinko oksit (ZnO) üretimi ve elektriksel özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı, Çukurova Üniversitesi: Adana.
39. Sequeira C. A. C. and Santos D. M. F. (2007). Four-Point Probe Electrical Measurements on p-n-p InP Structures. *Brazilian Journal of Physics*, 37(3B).
40. İnternet: Van der Pauw Method. wikipedia. URL:[http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fen.wikipedia.org%2Fwiki%2FVan\\_der\\_Pauw\\_method&date=2015-12-01](http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fen.wikipedia.org%2Fwiki%2FVan_der_Pauw_method&date=2015-12-01), Son erişim tarihi 01.12.2015
41. Kim, M. D., Baek, J. M., Kim, T. G., Kim, S. G., and Chung, K.S. (2006). Characterization of double floating guard ring type InP-InGaAs avalanche photodiodes with Au/Zn low resistance ohmic contacts. *Thin Solid Films*, 2006(514), p. 250-253.

42. Zeng, Q. Y., Wang, W. J., Wen, J., Huang, L., Liu, Z. H., Li N., and Lu W. (2014). Effect of surface charge on the dark current of InGaAs/InP avalanche photodiodes. *Journal of Applied Physics*, 115.
43. Shirshir, R. K. (2004). *Zinc Diffusion in GaAsSb From Spin-on Glass Dopant Sources*, Doctoral dissertation, University of Notre Dame Electrical Engineering. Notre Dame.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YILMAZ, Doğan  
 Uyuğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 12.09.1985, Malatya  
 Medeni hali : Evli  
 Telefon : 0 (505) 784 5360  
 e-mail : dogany@bilkent.edu.tr



### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler Anabilim Dalı	2016
Lisans	Hacettepe Üniversitesi/ Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü	2008
Lise	Kalaba Anadolu Lisesi	2003

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2008-Halen	Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi	Proje Mühendisi
2007	Aselsan	Stajyer
2007	Roketsan	Stajyer

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayımlar

#### Kongre Tebliğleri

- D. Yılmaz, Z. Kesgin, D. Çalışkan, Y. Arslan, N. Akın, S. Özçelik ve E. Özbay, (2015). "III -V Yarıiletken Yapılara Çinko ve Benzeri Atomların Difüzyonun Geliştirilmesi ve İncelenmesi", 17. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı 18 Eylül 2015, Ankara Türkiye

- D. Yılmaz, E.Ülker, D. Çalışkan, N. Akın, S. Özçelik ve E. Özbay, (2015). “III -V Yarıiletken Yapılara Çinko ve Benzeri Atomların Difüzyonun Geliştirilmesi ve İncelenmesi”, 21. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı 25 Aralık 2015, Ankara Türkiye
- Erkin Ülker, Tolga Yelboğa, Adil Burak Turhan, Doğan Yılmaz, Hongbo Yu, Ekmel Özbay. “Ultra Low Dark Current Solar Blind Focal Plane Arrays” Conference Proceedings – Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting-LEOS 10/2009; DOI:10.1109/LEOS.2009.5343291
- Yildirim Durmus , Dogan Yilmaz , Ahmet Toprak , A. Burak Turhan , Ozlem A. Sen , Ekmel Ozbay. “AlGaIn/GaN HEMT with  $f_T$ :100 GHz and  $f_{max}$ :128 GHz” Conference Proceedings - 2015 European Microwave Week (EuMW2015)

### **Hobiler**

Kitap okumak, Tenis, doğa yürüyüşleri



*GAZİ GELECEKTİR..*