

SAFİR ALTTAŞ ÜZERİNE
BÜYÜTÜLEN GaN HETEROYAPILARININ
HALL SİSTEMİ İLE
ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU

İSMAİL ALTUNTAŞ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

2012

CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SAFİR ALTTAŞ ÜZERİNE
BÜYÜTÜLEN GaN HETEROYAPILARININ
HALL SİSTEMİ İLE
ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU

İSMAİL ALTUNTAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. SEZAI ELAGÖZ
SİVAS

2012

Bu alışma Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanmış ve jürimiz tarafından Fizik Anabilim Dalı' nda yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Bařkan	Prof. Dr. Hüseyin SARI	_____
ye	Yrd. Doç. Dr. A. Gürkan YÜKSEK	_____
ye (Danışman)	Prof. Dr. Sezai ELAGÖZ	_____

ONAY

Bu tez çalışması, / 12 / 2011 tarihinde Enstitü Yönetim Kurulu tarafından belirlenen ve yukarıda imzaları bulunan jüri yeleri tarafından kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mustafa DEĞİRMENCİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 24.09.2008 tarihli ve 9 sayılı toplantısında kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu adlı yönergeye göre hazırlanmıştır.

İçindekiler

ÖZET	vii
ABSTRACT.....	viii
TEŞEKKÜR	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
SİMGELER DİZİNİ.....	xiii
KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
GİRİŞ.....	1
1. BÖLÜM	4
1.1. III-NİTRİT BİLEŞİKLERE GENEL BAKIŞ	4
1.1.1. III- N' lerin Kristal Yapısı	6
1.2. GAN HAKKINDA GENEL BİLGİ.....	6
1.2.1. Kullanılan Altaşlar.....	9
1.2.2. Isıl ve Kimyasal Kararlılık.....	10
1.2.3. Materyal Parametreleri	11
2. BÖLÜM	13
2.1. METAL YARIİLETKEN KONTAKLAR.....	13
2.2. İŞ FONKSİYONU	14
2.3. İDEAL METAL-YARIİLETKEN KONTAKTA SCHOTTKY-MOTT TEORİSİ	16
3. BÖLÜM	22
3.1. FOTOLİTOGRAFİ	22
3.1.1. Temizleme	22
3.1.2. Fotoresist Kaplama	22
3.1.3. Hafif Fırınlama (Soft-Bake).....	23
3.1.4. Foto-Mask Ayarlama, UV' ye Maruz Bırakma ve Kaldırma (Development).....	23
3.1.5. Katılaştırma (Hard- Bake) İşlemi	25
3.1.6. Aşındırma (Etching)	25
3.1.7. Metalizasyon ve Kaldırma (Lift-Off)	26
3.1.8. Tavlama	26
4. BÖLÜM	28
4.1. HALL OLAYI VE NUMUNE GEOMETRİLERİ	28
4.1.1. Hall Olayı.....	28
4.1.2. Termoloji	31
4.1.2.1. Voltaj Gösterimi	31
4.1.2.2. Akım Gösterimi	31
4.1.3. Numune Geometrileri	32
4.1.3.1. Hall Çubuk Geometrisi	32
4.1.3.2. Hall Çubuk Ölçümleri.....	33
4.1.3.2.1.6-Kontaklı (1-2-2-1) Hall Çubuğu	33
4.1.3.2.1.1.Özdirenç Hesabı	34

4.1.3.2.1.2.Magnetoözdirenç Hesabı	34
4.1.3.2.1.3.Hall Katsayısı Hesabı	35
4.1.3.2.1.4.Hall Mobilitesi Hesabı.....	35
4.1.3.2.2.6 Kontaklı 1-3-1-1 Hall Çubuk	35
4.1.3.2.2.1.Özdirenç Hesabı	36
4.1.3.2.2.2.Magnetoözdirenç Hesabı	36
4.1.3.2.2.3.Hall Katsayısı Hesabı	36
4.1.3.2.2.4.Hall Mobilitesi.....	36
4.1.3.2.3.8-Kontaklı (1-3-3-1) Hall Çubuk	37
4.1.3.2.3.1.Özdirenç Hesabı	37
4.1.3.2.3.2.Magnetoözdirenç Hesabı	38
4.1.3.2.3.3.Hall Katsayısı Hesabı	38
4.1.3.2.3.4.Hall Mobilitesi Hesabı.....	38
4.1.3.3. Van der Pauw Geometrisi	38
4.1.3.3.1.Van der Pauw Ölçümleri.....	41
4.1.3.3.1.1.Özdirenç Hesabı	42
4.1.3.3.1.2.Magnetoözdirenç Hesabı.....	43
4.1.3.3.1.3.Hall Katsayısı Hesabı	43
4.1.3.3.1.4.Hall Mobilitesi Hesabı	44
5. BÖLÜM	45
5.1. HALL OLAYI ÖLÇÜM SİSTEMİ (HEMS).....	45
5.2. HEMS DONANIMLARI	46
5.2.1. Kontrol Ünitesi	46
5.2.2. Miknatıs	47
5.2.3. Numune Tutucu	48
5.2.4. Yazılım.....	48
5.2.4.1. Genel Bakış.....	48
5.2.4.2. Program Açıklama	49
6. BÖLÜM	59
6.1. KATKISIZ GAN ÇALIŞMASI.....	59
6.2. KATKILI GAN ÇALIŞMASI	66
6.2.1. n-tipi katkılama	66
6.2.2. p-tipi katkılama	70
6.3. SONUÇ.....	72
ÖZGEÇMİŞ	73
KAYNAKÇA.....	74

ÖZET

SAFİR ALTTAŞ ÜZERİNE BÜYÜTÜLEN GaN HETEROYAPILARININ HALL SİSTEMİ İLE ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU

İsmail ALTUNTAŞ

Yüksek Lisans Tezi, Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Sezai ELAGÖZ

2012, 92 sayfa

Bu çalışmada Cumhuriyet Üniversitesi Nanoteknoloji Laboratuvarında kurulu bulunan MOCVD (Metalorganic Chemical Vapor Deposition) cihazı ile (0001) yönelimine sahip safir alttaş üzerine büyütülen epitaksiyel GaN ince filmlerin elektriksel karakterizasyonu yapılmıştır. Ayrıca akış oranlarının külçe ve tabaka taşıyıcı yoğunluklarına, Hall mobilitesine ve Hall katsayısına etkisi incelenerek araştırılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: MOCVD, Hall Olayı, GaN

ABSTRACT

ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF GaN HETEROSTRUCTURES GROWN ON SAPPHIRE SUBSTRATE BY HALL EFFECT MEASUREMENT SYSTEM

İsmail ALTUNTAŞ

MSc Thesis, Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Sezai ELAGÖZ

2012, 92 sayfa

In this work, we have investigated electrical characterization of epitaxial GaN heterostructures grown on sapphire substrate which have (0001) orientation by MOCVD that is founded in Nanotechnology Laboratory in Cumhuriyet University, Sivas. In addition we have studied flow rate effects on bulk and sheet carrier density, Hall mobility and Hall coefficient.

KEYS WORDS: MOCVD, Hall Effect, GaN

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım süresince değerli yardımlarını eksik etmeyerek, çalışmamın her aşamasında benimle bilgisini paylaşan, engin tecrübesi ve önerileri ile bana yol gösteren ve yönlendiren, her konuda ilgi ve desteğini eksik etmeyen çok değerli tez hocam Prof. Dr. Sezai ELAGÖZ' e en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen anneme, babama ve kardeşlerime ayrı ayrı teşekkür ederim.

Nanoteknoloji Laboratuvarındaki hocalarım ve arkadaşlarıma ölçümler sırasında ve tez yazım kısmında yaptıkları yardımlardan dolayı hepsine teşekkür ederim.

Bu Tez 108T015 no'lu “ III-N Tabanlı Malzemelerin MOCVD ile Yetiştirilmesi ve Yapısal Karakterizasyonları ” isimli proje ve F343 no'lu CÜBAP projesi tarafından desteklenmektedir.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 : Wurtzite III-N alaşımlar için örgü parametresinin fonksiyonu olarak enerji band aralığı	6
Şekil 2.1: Birbirlerinden bağımsız n-tipi yarıiletken ve bir metalin enerji bandlarının şematik gösterimi.....	15
Şekil 2.2: Metal/n-tipi yarıiletken kontak için elektron enerji-bant diyagramı. (a) Birbirinden ayrılmış nötral materyaller (b) kontak oluşturulduktan sonra termal denge durumu.	17
Şekil 2.3: Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak için elektron enerji-bant diyagramı (a) Termal denge durumu (b) doğru besleme (c) ters besleme.	19
Şekil 2.4 : $\Phi_s > \Phi_m$ için metal/n-tipi yarıiletken omik kontakın elektron enerji-bant diyagramı. (a) Birbirinden ayrı nötral materyaller; (b) termal dengede kontak; (c) yarıiletken doğru beslemede ve (d) yarıiletken ters beslemede.	21
Şekil 3.1 : Dönme-kaplama işleminin adımları. a) Fotoresist kontrollü biçimde numune yüzeyine dağıtılır, b) numune boyunca fotoresistin dağılmasına izin verilir, c) kaplayıcının dönme hızı hızlı bir biçimde artırarak fazla fotoresist numune üzerinden atılır, d) ince bir fotoresist tabakası oluşturmak için yüksek hızda döndürülür (Jones, 2008).	23
Şekil 3.2 : Işığa duyarlı bir malzemeye radyasyonun etkisi.	24
Şekil 3.3 : a) Pozitif resist, b) Negatif resist.	25
Şekil 4.1: Bir metale I akımı uygulandığında oluşan kuvvetler ve yönleri.....	28
Şekil 4.2 : a) Asal yarıiletken b) p tipi yarıiletken c) n tipi yarıiletken de elektron ya da boşluğun hareketi.....	30
Şekil 4.3 : p-tipi bir yarıiletkende oluşan kuvvetler ve yönleri.	30
Şekil 4.4 : Yaygın olarak kullanılan Hall çubuk geometrileri, $t=$ nüfuz edilen katman kalınlığı, buradaki siyah kısımlar kontaklardır.	32
Şekil 4.5 : 6-kontaklı 1-2-2-1 Hall çubuk geometrisi.	34
Şekil 4.6 : İdeal 1-3-1-1 Hall çubuk gösterimi.	36
Şekil 4.7 : 8-kontaklı (1-3-3-1) Hall çubuk geometrisi.	37
Şekil 4.8 : Yaygın olan Van der Pauw numune geometrileri. Kontaklar siyah kısımlardır.	39
Şekil 4.9 : Van der Pauw' un gösterdiği iki karakteristik direnç.	40
Şekil 4.10 : Numuneye uygulanan sabit bir akım ve sabit bir manyetik alan göstermektedir. ...	41
Şekil 4.11 : Van der Pauw geometrisi kullanarak öz direnç ve Hall katsayısının ölçümü.....	42
Şekil 5.1 : Sivas Cumhuriyet Üniversitesinde bulunan HEMS sistemi.....	45
Şekil 5.2: HEMS Kontrol Ünitesi.	46
Şekil 5.3 : HEMS sisteminde kullanılan Miknatis.	47
Şekil 5.4: İki taraflı numune tutucular	48
Şekil 5.5 : HEMS yazılımının ana görünümü.	49
Şekil 5.6: Ayarlar kısmı.	51
Şekil 5.7: Ayarlar sekmesindeki cihaz konfigürasyonu sekmesi.....	52
Şekil 5.8 : Ayarlar kısmındaki boyut ayarları sekmesi.....	53
Şekil 5.9 : Field Task'ın seçenekleri.	54
Şekil 5.10 : I-V görevinin seçenekleri.	55
Şekil 5.11: Sweep Task' ın görünümü.	56
Şekil 5.12: Check Connection' ın görünümü.	57
Şekil 5.13 : Manyetik alan kontrol bölgesi.....	58
Şekil 5.14 : Text Area görünümü.....	58

Şekil 6.1: CN006 numunesine ait theta-twotheta taraması.....	63
Şekil 6.2: CN006 numunesine ait (00.2) GaN sallantı eğrisi.....	64
Şekil 6.3: CN001, CN005, CN021, CN022, CN027, CN030, numunelerine ait (00.2) GaN sallantı eğrisi.....	64
Şekil 6.4: Tabaka taşıyıcı yoğunluğunun SiH ₄ akış oranı ile değişimi.....	68
Şekil 6.5 : Silane akış oranının Hall katsayısına etkisi.	69
Şekil 6.6 : Silane akış oranının mobiliteye etkisi.	69

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1: Epitaksiyel büyütmeye alttastaan dolayl karşılaşılan sorunlar.	9
Çizelge 1.2: GaN büyütmeye kullanılan alttastarla ilgili bazı önemli parametreler.	10
Çizelge 1.3: Epitaksiyel GaN büyütmeye en çok kullanılan alttastaların avantajları ve dezavantajları.	10
Çizelge 1.4: GaN' e ait 300 K'de ki temel parametreler.	11
Çizelge 2.1: İş fonksiyonlarına göre doğrultucu ve omik kontaklar	16
Çizelge 5.1: HEMS Sisteminde kullanılan mıknatısların özellikleri.	47
Çizelge 5.2: HEMS sistemin yazılımın ana görünümdeki komutlar ve bunların görevleri.	49
Çizelge 5.3: Ayarlar kısmında bulunan sekmelerden genel sekmesinin maddeleri ve görevleri.	51
Çizelge 5.4: I-V karakteristiğindeki seçenekler ve görevleri.	55
Çizelge 5.5: Sweep Task' deki seçenekler ve bu seçeneklerin işlevleri.	56
Çizelge 6.1: Katkısız GaN çekirdeklenme (nucleation) çalışması.	60
Çizelge 6.2: Katkısız GaN tampon tabakası büyütmeye parametreleri.	61
Çizelge 6.3: Seçilmiş numunelerde yapılan sallantı eğrilerinin sonuçları.	65
Çizelge 6.4: Hall ölçüm sonuçları.	65
Çizelge 6.5: Si katkılı GaN için büyütmeye çalışması.	66
Çizelge 6.6: CN035 nolu numune için alınan Hall ölçümleri.	66
Çizelge 6.7: CN036 nolu numune için alınan Hall ölçümleri.	67
Çizelge 6.8: CN037 nolu numune için alınan Hall ölçümleri.	67
Çizelge 6.9: Farklı numunelerin SiH ₄ akış oranına bağlılığı verilmiştir.	68
Çizelge 6.10: Mg katkılı GaN büyütmeye çalışması.	70
Çizelge 6.11: CN038 nolu numune için alınan ölçümler.	70
Çizelge 6.12: CN042 nolu numune için alınan ölçümler.	71
Çizelge 6.13: CN043 nolu numune için alınan ölçümler.	71
Çizelge 6.14 : CN038, CN042 ve CN043 nolu numunelerin Cd ₂ Mg akış oranına bağlılıkları.	72

SİMGELER DİZİNİ

a	: Örgü parametresi
a	: Van der Pauw geometrisindeki numunenin kenar uzunluğu
b	: Bowing parametresi
b	: Hall çubuğunda kontaklar arasındaki mesafe
B	: Manyetik alan
c	: Dikey örgü parametresi
d	: Kalınlık
e	: Elektron yükü
E_c	: İletkenlik band kenarı
E_F	: Fermi seviyesi
E_g	: Yasak enerji aralığı
E_v	: Valans band kenarı
f	: Geometrik faktör
F_e	: Elektrik kuvvet
F_m	: Manyetik kuvvet
I	: Akım
I	: İyonizasyon Enerjisi
$I_{\max}$	: Maksimum uyarma akımı
$I_{\min}$	: Minimum uyarma akımı
$I_{ij}^+(B)$	: Uygulanan B manyetik alan altında akımın i' den j' ye doğru aktığını gösterir.
$I_{ij}^-(B)$	: Uygulanan B manyetik alan altında akımın j' den i' ye doğru aktığını gösterir.

k	: Dönme sabiti
n	: Hareketli yük yoğunluğu
N	: Azot
n_s	: Taşıyıcı yoğunluğu
q	: Elektronik yük
Q	: Direnç oranlar fonksiyonu
p	: Resist katkı yüzdesi
r	: Hall saçılma faktörü
R_H	: Hall katsayısı
R_{Hav}	: Ortalama Hall katsayısı
R_{max}	: Kontaklar arasındaki maksimum direnç
R_s	: Tabaka direnci
t	: Kaplanan resistin kalınlığı
t	: Hall çubuğunun kalınlığı
T	: Tesla
w	: rpm/1000 dönme hızı
ω	: Hall çubuğunun genişliği
V	: Gerilim
V_{cl}	: Compliance limit
v_d	: Sürüklenme hızı
V_F	: Uygulanan voltaj
V_H	: Hall voltajı
V_{24}	: 2 ve 4 nolu kontaklar arasındaki ölçülen voltaj

$V_{ij,kl}^+(B)$:Uygulanan B manyetik alan altında, akım i' den j' ye doğru aktığında k ve l kontaktları arasındaki voltaj farkı.

$V_{ij,kl}^-(B)$:Uygulanan B manyetik alan altında, akım j' den i' ye doğru aktığında k ve l kontaktları arasındaki voltaj farkı

ϕ_B : Engel yüksekliği

ϕ_m : Metalin iş fonksiyonu

ϕ_s : Yarıiletkenin iş fonksiyonu

Δ : Van der Pauw geometrisindeki kontaktların boyutu

ρ : Özdirenç

ρ_{av} : Ortalama özdirenç

ϵ_0 : Dielektrik sabiti

μ_H : Taşıyıcı mobilitesi

χ_s : Elektron ilgisi

ξ : İletkenlik bandının altı ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkı

λ : Dalgaboyu

KISALTMALAR DİZİNİ

Bright LEDs	: Parlak Işık Yayan Diyotlar
DC	: Doğru Akım
DI	: Deionized Water
HEMS	: Hall Olayı Ölçüm Sistemi
HFETs	: Heteroyapılı Alan Etkili Transistorler
HMETs	: Yüksek Elektron Mobiliteli Transistorler
GaN	: Galyum Nitrat
JFETs	: Eklem Alan Etkili Transistorler
LEEBI	: Düşük Enerjili Elektron Demet Işınımı
LDs	: Lazer Diyotlar
LEDs	: Işık Yayan Diyotlar
MESFETs	: Metal Yarıiletken Alan Etkili Transistorler
MOCVD	: Metal Organik Kimyasal Buhar Depolama
RIE	: Reaktif İyon Aşındırma
RTA	: Hızlı Termal Tavlama
Si	: Silisyum
UHV	: Çok yüksek vakum.
UV	: Ultraviyole
ZnS	: Çinko Sülfür (Zincblende)
XRAY	: X ray diffraction

GİRİŞ

Günümüz yarıiletken teknolojisinde kullanılan en yaygın malzeme silisyum (Si) dur. Bunun yanı sıra III-V grubu malzemeler de yarıiletken teknolojisinde çok önemli bir yer tutar. Bu malzemelerden, bazı alanlarda daha üstün özelliklere sahip olan GaAs/GaAlAs tabanlı heteroyapılar silisyumun yerini alırken, yeni malzeme arayışları da hızla devam etmektedir. Son yıllarda geniş bant aralığı ve yüksek kırılma gerilimine sahip olması nedeni ile III-N tabanlı malzemeler çalışılmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı yüksek voltaj ve yüksek sıcaklıklar da çalışabilen elektronik devre elemanları yapımında çok önemli yer tutarlar. Bunların yanı sıra geniş bant aralıkları, kırmızıdan mor ötesi dalga boylarına uzanan renklerde ışık üretilbilmesine olanak verdiğinden görünür bölgeyi de kapsamak üzere spektrumdaki tüm optoelektronik uygulamalar için de aranan malzemeler olmuşlardır. Bu malzemeler ve alaşımlarının bant aralıkları 0.69 eV- 6.2 eV arasında değişerek araştırmacılara, oda sıcaklığında çalışan mor ötesi ışıyıcıları, mavi/morötesi ışık yayan diyot (LEDs) ve lazer diyot (LDs), parlak ışık yayan diyotlar (Bright LEDs) yapma imkanı sağlarlar. Kırmızı ve yeşil renk LED’ler üretilmiş olmasına rağmen mavi LED’ler ancak III-N yapıları kullanılarak elde edilebilmiş ve artık beyaz ışık elde etmekte kullanılmaya başlanmıştır. Bu alandaki çalışmaların çok önemli güç tasarrufuna yol açacağı açıktır. Ayrıca bu özellikleri ile; arka ışıklandırma yani “*Back Plane Lighting*” ile, cep telefonlarının parlak ekranlarında, LCD TV’lerin parlak ışıklarında ve hatta araba radyolarımızı aydınlatmada yerlerini almıştır. Ayrıca mavi LED elde edilmesi ile optik depolama teknolojisinde uzun zamandır beklenen büyük gelişme gerçekleşmiştir. III-N yapılarının teknolojik uygulamaları bunlarla kalmayıp çok önemli ve stratejik bir alan olan detektör tasarımında da kullanılmaya başlanmış, örneğin Güneş Körü (Solar Blind) detektörler yapımına imkân sağlamıştır.

III-N alaşımlarının bir diğer kullanım alanı ise, yüksek güç ve yüksek frekans gerektiren uygulamalardır. Yüksek kırılma gerilimine ve piezoelektrik etkilerine sahip olan bu materyal grubunun bu alanlarda da kullanımları giderek artmıştır. Bu çalışmalar sonucunda, Yüksek Elektron Mobiliteli Transistorler (HMETs), Metal Yarıiletken Alan Etkili Transistorler (MESFETs), Heteroyapılı Alan Etkili Transistorler (HFETs), Eklem Alan Etkili Transistorler (JFETs) ve benzeri elektronik elemanların yapılmasını mümkün kılmıştır.

Kısaca özetlenirse, III-N yapıları ve alaşımları elektronikte ve opto-elektronikte önemli uygulamalarda kullanılmaktadır ve yapılan her yeni çalışma ile birlikte bu alan

hızla genişlemektedir. Teknolojide bu kadar geniş uygulama alanı bulmasına rağmen, şu ana kadar III-N yapılarının temel özellikleri hakkındaki bilgilerimiz yetersizdir. Altaş eksikliği, sıkıntılardan bir tanesidir, altaş büyütülen heteroyapınının kristal kalitesini dolayısıyla da cihaz performansını etkiler. Cihaz performansını etkileyen diğer önemli faktörler ise kusur yoğunluğu, yüzey/ara yüzey morfolojisi ve tabaka düzgünlüğü (layer uniformaty/flatness) gibi yapısal özellikler olarak özetlenebilir. Bu nedenle uygun altaş arayışı, MOCVD tekniği için gerekli pilot gazların (precursor) geliştirilmesi, büyütme parametreleri, alaşım oranına göre yapısal değişiklikleri ve bu yapılar ile elde edilen elektronik/opto-elektronik cihaz verimi parametreleri çalışılması gereken önemli araştırma alanlarıdır. Özellikle ülkemiz açısından stratejik öneme sahip aygıt yapımı (askeri amaçlı detektörler) düşünülecek olursa bu teknolojik bilginin (Know-How) mutlaka edinilmesi gerekmektedir. Bu konuda araştırma yapan araştırmacılarımız, dışarıda ürettirdikleri numunelerde ya istenen kalite yakalanmadığı için ya da söz konusu numunelerin satılmalarının yasak olmaları (Classified Material) gibi nedenler ile bu alanda çağdaşlarını yakalayamamışlardır. Ülkemizde yeni de olsa bu konuda çalışmaların başladığını bilmek bu açıdan önemli ve bir o kadar da sevindiricidir. Bu nedenlerden dolayı, III-N tabanlı malzemelerin üzerinde araştırma yapılması yeterince vurgulanamayacak kadar önemlidir.

Türkiye'nin ikinci kendi alanında ise ilk sayılabilecek nitelikte olan Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Nanoteknoloji Laboratuvarında kurulu MOCVD sistemi özel olarak yapılan tasarımı dolayısı ile N ve As/P grubu yetiştirilebilecektir. Yine Cumhuriyet Üniversitesi Nanoteknoloji Laboratuvarında kurulu bulunan XRD sistemimiz ise dönen anoda sahip olduğundan dolayı özellikle ince film analizleri için önemli bir açığı doldurmuştur. Dolayısıyla kısaca özetlediğimiz kristal büyütme yanı sıra temel yapısal karakterizasyonları da laboratuvarımızda yapılabilecektir. Bu aşamalar sonucunda kristal kaliteleri belirlenen numuneler üzerinde elektriksel karakterizasyon yapılmalıdır. Bu inceleme neticesinde büyütme parametrelerine ve yapısal özelliklere göre yapılarda I-V, taşıyıcı mobilitesi, taşıyıcı cinsi, taşıyıcı konsantrasyonu vb., parametreler belirlenecektir. Bu alandaki en önemli noktalarda biriside bu yapılar ile n tipi ve p tipi malzeme yetiştirilmesidir. Elektronik ve opto-elektronik cihaz yapımı için şart olan n ve p tipi materyallerin ardışık büyütülebilmesi ve istenilen taşıyıcı konsantrasyonlarının elde edilebilmesi hayati önem taşımaktadır. Bu analizler ise Hall etkisi ölçümleri ile yapılabilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında; Safır alttaş üzerinde büyütölen GaN epitaksiyel tek kristal filmlerinin Hall ölçömlerinin yapılması planlanmaktadır. Cumhuriyet Üniversitesi Nanoteknoloji laboratuvarında kurulu bulunan HEMS (Hall Effect Measurument System) sistemi ile numunelerin direnç, Hall katsayısı, katkılama, mobilite ve I-V karakteristikleri belirlenecektir. Bu ölçömler sonucunda elektriksel özellikleri anlaşılan numunelerin istenilen kalitede olup olmadığı ve büyütme koşullarının bu özellikler üzerindeki etkileri araştırılacaktır.

1. BÖLÜM

1.1. III-Nitrit Bileşiklere Genel Bakış

Periyodik cetvelde VA grubu elementi olan azotun (N) IIIA grubu elementlerle yapmış olduğu bileşikler III-N (III-azot) ya da III-Nitratlar şeklinde adlandırılmaktadır. III-N bileşikleri mavi ve ultraviyole (UV) den kızılötesine kadar geniş bir spektrumu kapsamaları nedeniyle uzun zamandır gelecek vaat eden yarıiletken cihaz uygulamalarına yatkın malzeme grubu olarak görülmektedirler (H.Morkoç, 1992). III-N' ler çok önemli kimyasal, elektronik ve optoelektronik özelliklerinden dolayı üzerinde yoğun çalışmalar yapılan bir malzeme grubudur. Sağlık, askeri, iletişim, uydu, uzay sistemleri ve güneş hücreleri gibi birçok alanda elektronik ve optoelektronik cihaz yapımına olanak sağladıklarından yaygın bir biçimde tercih edilmektedir.

III-N' lerin tarihi gelişimine kısaca bakacak olursak; III-N araştırmalarının son zamanlardaki başarısı Manasevit'in 1960'lı yılların sonlarında metal organik kimyasal buhar depolama (MOCVD) tek kristal büyütme tekniğini ortaya çıkarmasıyla başlamıştır (M.Manasevit, 1968). Bundan kısa bir süre sonra Manasevit ve ekibi metal-organikleri kullanarak bu tekniği safir alttaşı üzerine GaN büyütme için kullanmışlardır (H.M.Manasevit, 1971). 1990'lı yılların başına kadar görünür dalgaboylu LED'ler kızılötesinden kırmızıya kadar AlGaAs bileşiği ile, kırmızıdan sarıya kadar olanlar GaAsP bileşiği ile ve yeşil renk için GaP gibi geleneksel III-V grubu bileşik yarıiletkenlerle yapılmaktaydı. SiC tabanlı geniş band aralıklı cihazlar mavi dalga boyunda ışık yaymalarına rağmen bu malzemenin düşük verimliliğe yol açan indirekt band aralığı onun ticarileştirilmesinin önündeki en büyük engel olmuştur. II-VI yarıiletken grubu gibi geniş band aralığına sahip malzemeler mavi ışık üretimi için incelenmiş olmasına rağmen, III-N' ler görünür ve mor-ötesi ışık uygulamaları için üstün nitelikli özelliklerinden dolayı kademeli olarak diğer tüm malzeme gruplarına üstünlük sağlamışlardır.

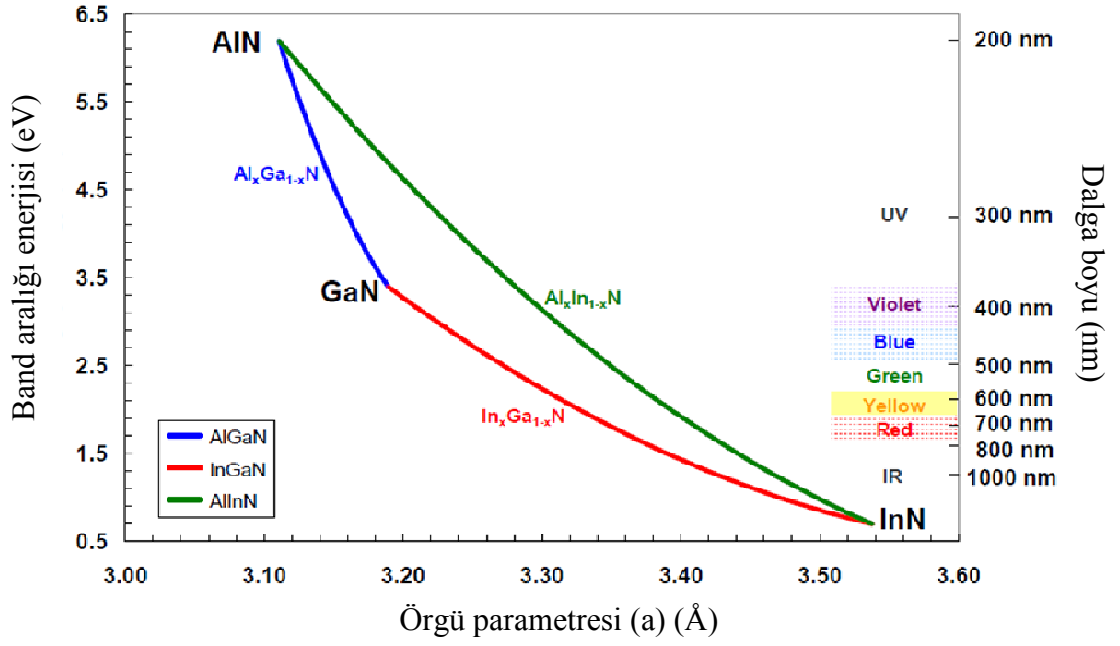
Azot atomu V grubu elementleri arasında en güçlü elektronegativiteye sahip olan atomdur. Azot ve III grubu elementler arasındaki büyük elektronegativite farkı Ga, Al, ya da In arasındaki kovalent bağa güçlü iyonik bağ bileşeni ekler ve sonuç olarak sıkı bağlı bir kristal yapı oluşur. Ayrıca III-N' lerin valans bandındaki yük taşıyıcıları, azot atomlarının güçlü elektron afiniteleri nedeniyle iyi lokalize olmuşlardır. Bu özellikleri III-N yarıiletkenleri yüksek-güç/yüksek sıcaklık uygulamaları için öncü materyal haline getirmiştir. Azot atomları III-N malzemelerde büyük iyonik bağ bileşeni

oluşturur, böylece bu atomlar sıkı bağlı kristal yapısı oluşturmada önemli rol oynarlar. AlN, GaN ve InN için bağlanma enerjileri sırasıyla 11.5 eV/atom, 8.9 eV/atom ve 7.7 eV/atom,' dur. GaAs için ise bağlanma enerjisi 6.5 eV/atom'dur. Büyük bağlanma enerjisi ile sıkı bağlı yapılar, diğer yarıiletkenlerle karşılaştırıldığında daha kısa kimyasal bağ oluşumuna katkı sağlarlar. Bu özellik, geniş band aralığı ile birleştirildiğinde III-N'leri ideal olmayan ortamlarda birçok optoelektronik cihaz için mükemmel bir aday haline getirmektedir. III-N malzeme sisteminin en önemli avantajlarından biri InN ve AlN heteroyapılarının oluşturulmasıyla band aralığı enerjisinin 0.7 eV (1.7 μ m)' den 6.2 eV (0.2 μ m)' ye kadar ayarlanabilir olmasıdır. Wurtzite yapıdaki InN için temel band aralığı enerjisi son zamanlarda yaklaşık olarak 0.7 ev olarak keşfedilmiştir (H.Morkoç, 1992) ki bu da InN malzemesinin dar band aralıklı bir yarıiletken olduğunun belirtisidir. InN için son zamanlarda keşfedilen dar band aralığı enerjisi III-N yarıiletken cihazların çeşitli koşullarda çalışması için büyük avantaj sağlamıştır. Örneğin InN ile oluşturulan GaN alaşımı $\lambda = 1.33 \mu\text{m}$ ya da $1.55 \mu\text{m}$ gibi optik iletişim için kullanılan uzun dalga boylarında çalışacak cihazlar yapılabilir.

Şekil 1.1' de görüldüğü gibi GaN, InN ve AlN ve bunları içeren alaşım sistemlerinin örgü parametresinin bir fonksiyonu olarak band aralığı enerjisinin değişimi gösterilmektedir (H.Morkoç, 1992). Şekil 1.1' de InN' nin band aralığı olan 0.7 eV den başlayarak AlN' in band aralığı olan 6.2 eV ye kadar uzanmaktadır. Dolayısıyla alaşım oranına göre çok geniş bir spektruma sahiptir. $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{N}$ alaşımı için alaşım konsantrasyonunun band aralığı enerjisinin oranına bağlılığı denklem 1.1 ile verilmektedir (J. Wu W. W., 2003).

$$E_g^{\text{AlInN}}(x) = E_g^{\text{AlN}}(x) + E_g^{\text{InN}}(1 - x) - bx(1 - x) \quad [1.1]$$

AlInN için b (bowing) parametresi teorik olarak ab initio pseudopotential hesaplamalarından 2.53 eV elde edilmiştir. InGaN ve AlGaN materyal sistemi için b parametreleri sırasıyla 1 eV ve 1.4 eV olarak bulunmuştur (J. Wu W. W., 2003), (A.F. Wright, 1995).



Şekil 1.1 : Wurtzite III-N alaşımlar için örgü parametresinin fonksiyonu olarak enerji band aralığı.

1.1.1. III- N' lerin Kristal Yapısı

III-N yapılar temel olarak üç farklı kristal yapıda bulunmaktadır, bunlar; zincblende (ZnS), kayatuzu (NaCl) ve wurtzite (α fazı) yapılarıdır. (Al, Ga, In)/N yarıiletken bileşiklerinin dış ortam koşullarında termodinamiksel kararlı yapıları wurtzite yapısıdır. Daha yüksek kristal kalitesi ve daha kararlı özellikler gösterdiğinden elektronik ve optoelektronik uygulamalarda wurtzite kristal yapısı daha çok kullanılmaktadır. GaN ve InN ince filmleri; Si, SiC, MgO ve GaAs gibi kübik yapılu alttaşların (001) yönelimli kristal düzlemleri üzerine epitaksiyel ince filmler olarak büyütülürse kararlı zincblende yapısında kristalleşirler (Morkoç, 1999). III-N' ler kayatuzu formuna ise yalnızca yüksek basınç altında (AlN için 22.9 GPa (Xia, 1993), GaN için 52.2 GPa (P.Perlin, 1992) ve InN için 12.1 GPa (M. Ueno, 1994) geçtiklerinden herhangi bir epitaksiyel kristal büyütme yöntemi ile büyütülemezlerdir.

1.2. GaN Hakkında Genel Bilgi

Galyum nitrat (GaN), yüksek kırılma voltajına sahip olup hızlı taşıyıcı iletimi gerektiren tüm III-N malzeme grubu cihazlarda kullanılan tipik bir malzemedir. Bu yüzden GaN, AlN ve InN malzeme gruplarından çok daha geniş bir şekilde çalışılmaktadır. Fakat, Si ve GaAs gibi teknolojik olarak önemli malzemeler seviyesinde anlaşılması için hala geniş ölçüde araştırılma ihtiyacı duyulmaktadır. GaN malzemesini üretebilmek hem

uygun alttaş eksikliği hem de GaN'ın güçlü kimyasal bağ yapısı nedeniyle zor bir işlemdir. GaN'ın erime sıcaklığı 2493 K gibi yüksek bir sıcaklıktır. GaN büyütme için gerekli olan sıcaklık 1000 C° 'den büyüktür. Bu sıcaklık diğer yarıiletken bileşiklerden oldukça büyüktür ve GaN sentezini daha zor hale getirmektedir (W. Utsumi, 2003).

GaN kristalinin büyütülmesinde karşılaşılan sorunlardan ilki GaN'ın kimyasal özelliğinden gelen zorluktur. Ga ve N atomları arasındaki güçlü kimyasal bağ 2493 K gibi çok yüksek bir erime noktası ortaya çıkarmaktadır; (W. Utsumi, 2003) aynı zamanda azot molekülünün aşırı asal olması 1200 C° de 1000 atm lik yüksek bir azot buharı basıncı ortaya çıkarmaktadır. Malzeme büyütme sıcaklığı genellikle erime sıcaklığının 1/2' si ile 2/3' ü civarındadır ve bu sıcaklıklarda büyütme yüzeyi üzerindeki reaktantlar yüzey difüzyonu ve bölünme için yeterli termal enerjiye sahip olurlar. GaN için gerekli olan bu büyütme sıcaklıkları (> 1000 C°) diğer yarıiletken bileşiklerden oldukça büyüktür ve yüksek azot buharı basıncı GaN sentezini daha zor hale getirmektedir.

GaN büyütülmesi önündeki ikinci sorun, uygun alttaş eksikliğinden kaynaklanmaktadır. Külçe GaN malzemesinin hala kaliteli ve yaygın bir biçimde üretilmemesinden dolayı GaN alttaş kullanılamamaktadır. Tarihsel olarak safir, GaN ile aralarındaki örgü uyumsuzluğuna ve büyük termal genleşme katsayıları farkına rağmen GaN'ın epitaksiyel olarak büyütülmesinde alttaş olarak en çok kullanılan malzemedir. GaN'ın kristal kalitesini geliştirecek birçok atılım yapılmıştır. Bunlar arasında en önemlilerinden birisi, Akasaki ve grubunun 1986 yılındaki MOCVD ile safir alttaş üzerine düşük sıcaklıkta AlN ara tabaka büyüterek ve daha sonra yüksek sıcaklıklara çıkıp yüksek kalitede GaN tabakasının büyütüldüğü çalışmadır (H. Amano, 1986). Bu çalışmada büyütülen tampon tabakanın alttaş ile GaN tabakası arasındaki arayüzey serbest enerjisini düşürdüğü ve bu sayede daha az pürüzlü bir arayüzey ve daha kaliteli GaN kristalinin büyütüldüğü ortaya koyulmuştur. Nakamura ve grubu daha sonra GaN kristal kalitesini iyileştirmek için düşük sıcaklıkta GaN ara tabakası büyütmüşlerdir (S. Nakamura, 1992) ve bu çalışmayla kristal kalitesi artırılarak mobilitenin artması sağlanmış olup böylece elektriksel özelliklerinin de geliştirildiği ortaya koyulmuştur.

Geniş bant aralıklı elementlerin katkılanmaları ve katkı miktarının kontrolü oldukça zor olduğundan III-N'lerin kristal yapılarındaki bu gelişmelere rağmen p-tipi katkılama yapılamaması elektronik ve optoelektronik cihaz yapımı önündeki en önemli engellerden birisi olarak durmakta idi. Bunun temel nedeni, bant aralığı geniş

olduğundan gerek alıcı gerek verici atomların enerji düzeylerinin derinde olmasıdır. Öyle ki, oda sıcaklığında, ısısal enerji bunların iyonize olmaları için yeterli değildir. Katkılama olmaksızın büyütülen GaN numunelerin düşük n-tipi katkılanmış gibi davrandığı gözlenmiştir. Bunun sebebi olarak çeşitli görüşler öne sürülmesine rağmen azotun asal doğası ve GaN üzerindeki yüksek buhar basıncı nedeniyle, büyütülen GaN azot eksikliğinden ya da oksijen kirlenmesinden oluştuğuna işaret etmektedir (Ekinci, 2008). Kontrollü bir şekilde p-tipi katkılamayı başarabilmek için Mg (magnezyum) en genel katkılama elementi adaydır fakat başlangıçta MOCVD ile üretilmiş büyütme esnasında Mg katkılanmış GaN p-tipi iletkenlik göstermemiştir. 1989 yılında Akasaki ve grubu Mg katkılı GaN'da ki magnezyumu, düşük enerjili elektron demeti ışınımı (LEEBI) ile incelerken tesadüfen p-tipi katkılamayı keşfetmişlerdir (H. Amono, 1989). 1992 yılında Nakamura p-tipi iletkenliği elde etmek için örneği tavlama (annealing) ve p-tipi katkılamayı on kat arttırmıştır. Nakamura aynı zamanda MOCVD'de hidrojen kullanımının Mg akseptörlerini etkisizleştirdiğinden GaN filmlerin yalıtkan olduğunu ve katkılamanın hidrojenli, hidrojenli ortamda (vakum ya da azot) tavlama ile aktif edilebildiğini ortaya koymuştur. Yukarıda bahsedilen önemli ilerlemeler 1993 yılında Nichia'nın mavi InGaN LED'i ticarileştirmesiyle sonlanmıştır. Yüksek kapasiteli optik veri saklama endüstrisinin uzun zamandır beklediği bu önemli buluş ile ilgili çalışmalar büyük bir ivme kazanmıştır. Bu olaydan sonra nitrat bileşikli yarıiletkenler teknolojisi araştırma geliştirme çalışmaları tüm dünyada çok büyük bir ilgi odağı olmuştur ve bu konuda önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Ayrıca alüminyumca zengin AlGaIn alaşımları 200-300 nm dalga boyu aralığını kapsar ve morötesi ışık kaynakları ve sensörlerinin geliştirilmesi için ideal malzemelerdir. Çünkü AlGaIn alaşım oranı ve heteroyapı dizaynı değişimi ile band aralığı mühendisliği yapılmasına olanak sağlamaktadır.

Son zamanlarda mavi ışık yayıcı diyot (mavi LED) potansiyel oluşturması sebebiyle GaN' a olan ilgi yeniden canlanmıştır. Modern araştırmacılar kristal büyütme ve üretim teknolojilerini geliştirerek önceki çalışmalarda karşılaşılan zorlukların üstesinden gelmeye çalışmaktadırlar. Farklı alttaş türleri üzerinde oda sıcaklığında n tipi taşıyıcı konsantrasyonu yaklaşık $6 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ olan yüksek kalitede GaN üretmişlerdir. Bir grup p-tipi GaN için bu süreci geliştirerek ilk pn eklemlili ışık yayan diyot'u (pn junction LED) gösterme imkanını bulmuşlardır. Hala birçok grup GaN tabanlı cihaz yapılarını çalışmaktadır. Birçok çalışma hem GaN' ın temel fiziksel özelliklerinin

belirlenmesi hem GaN cihaz teknolojisinin gelişmesi için başarılı bir şekilde devam etmektedir (Bour, 1997).

1.2.1. Kullanılan Alttaşlar

Alttaş olarak kullanılabilecek ve benzer özellikler gösteren AlN, InN ve özellikle külçe GaN kristallerinin ucuz ve kolay bir biçimde ticari ölçekte üretilmemesinden dolayı araştırmacıların çoğu GaN tabanlı cihaz yapımında heteroepitaksi çalışmalarına yönelmişlerdir. Fakat son zamanlarda kaliteli GaN alttaşlar elde edilmiş olmasına rağmen fiyatının çok yüksek olmasından dolayı yalnızca ArGe çalışmaları için kullanılmaktadır. Bu amaçla yarıiletkenler kadar metaller, metal oksitler, metal nitritler alttaş malzemesi olarak geniş ölçekli biçimde araştırılmaktadır. GaN malzemesi farklı alttaşlar üzerine büyütüldüğünden dolayı iki malzeme grubu arasında dikkat edilecek en önemli hususlar alttaşın fiyatı, örgü parametreleri arasındaki farklar, kimyasal ve fiziksel karakteristikler, yüzey özellikleri, termal ve elektriksel özellikler gibi epitaksiyel tabakanın kristal kalitesini önemli derecede etkileyecek unsurlardır. Çizelge 1.1’ de (Demir, 2011) alttaş ile büyütülen tabakalar arasındaki bazı uyumsuzlukların ortaya çıkardığı sorunlar kısaca özetlenmiştir. Ayrıca Çizelge 1.2’ de (Demir, 2011) GaN büyütme için kullanılan alttaşların temel özellikleri verilmektedir. Çizelge 1.3’ te de epitaksiyel GaN büyütmede en çok kullanılan alttaşların avantajları ve dezavantajları yer almaktadır (Demir, 2011).

Çizelge 1.1: Epitaksiyel büyütmede alttaştan dolayı karşılaşılan sorunlar.

Alttaş özelliği	Sonuç
Yanal (a-örgü sabiti) uyumsuzluk	Yüksek oranda dislokasyon yoğunluğu; cihazlarda yüksek kaçak akımı; azınlık taşıyıcılarında kısa yaşam süresi; termal iletkenlik düşmesi; hızlı impurity difüzyon yolları
Dikey (c-örgü sabiti) uyumsuzluk	Faz dışı sınırlar; ters bölge sınırları
İzomorf olmayan alttaşlarda yüzey adımları	Diziliş uyumsuzluğuna sahip sınırlar
Termal genleşme katsayısı uyumsuzluğu	Film ve alttaşta termal olarak indüklenmiş stresler; film ve alttaşta çatlak oluşumu
Düşük termal iletkenlik	Zayıf ısı dağılımı
Epitaksiyel filmde daha farklı kimyasal bileşim	Alttaştaki elementler tarafından kirlilik; sallanan bağlar (dangling bonds) tarafından üretilmiş elektronik arayüz durumları; büyütülen filmle alttaş arasında zayıf bağ yapısı
Polar olmayan yüzeyler	Epitaksiyel filmde karışık polarizasyon

Çizelge 1.2: GaN büyütmede kullanılan alttaşlarla ilgili bazı önemli parametreler.

Malzeme	Örgü sabiti ($10^{-10} m$)	Örgü uyumsuzluğu (%) / AlN	Termal genleşme ($10^{-6} K^{-1}$)	Termal iletkenlik ($W cm^{-1} K^{-1}$)	Erime noktası (K)
GaN	$a = 3.189$ $c = 5.185$	$-/2.4$ $-/3.9$	5.59 3.17	4.1	2791
Safir	$a = 4.7589$ $c = 12.991$	$-16.0/-13.3$	7.3 8.5	0.41	2303
6H – SiC	$a = 3.0806$ $c = 15.1173$	$-3.5/-1.0$	4.46 4.16	4.9	3102
Si(111)	$a = 3.84$	$-17.0/19.0$	2.6	1.3	1412
LiAlO₂	$a = 5.169$ $b = 6.268$	$-0.3/3.6$ $-1.8/0.7$	7.1 15	–	1775

Çizelge 1.3: Epitaksiyel GaN büyütmede en çok kullanılan alttaşların avantajları ve dezavantajları

Alttaş	Avantajları	Dezavantajları
Si	Düşük maliyet Yaygın biçimde mevcut Si elektroniği ile entegrasyon İletken ve yalıtkan formunda elde edilebilmesi	GaN ile yüksek termal uyumsuzluk Zayıf termal iletkenlik
SiC	Yüksek termal iletkenlik GaN ile düşük örgü uyumsuzluğu İletkenlik	Yüksek maliyet Yüksek kusur yoğunluğu
Al₂O₃	Düşük maliyet Yaygın biçimde mevcut Yüksek sıcaklıkta kararlılık Kolay temizleme	Çok zayıf termal iletkenlik GaN ile yüksek örgü uyumsuzluğu Yalıtkan

1.2.2. Isıl ve Kimyasal Kararlılık

III-nitrür grubu materyalleri yüksek ısı ve kimyasal dayanıklılığa sahip olduklarından, yüksek sıcaklıkta, kötü ve aşındırıcı ortamlarda çalışabilen cihazlar yapımında gelecek vaat etmektedirler. Si ve GaAs gibi sıkça kullanılan diğer yarıiletkenler ile karşılaştırıldığında yüksek gerilim – yüksek güç uygulamalarına olanak sağlayan geniş band aralığının yanı sıra, yüksek erime noktasına sahip olmasını sağlayan yüksek bağ enerjilerine sahiptir. GaAs sadece 6.52 eV/bağ' lık bir bağ enerjisine sahipken GaN 8.92 eV/bağ ve AlN 11.52 eV/bağ' lık bağ enerjilerine sahiptir (S.J. Pearton, 1999).

Bu güçlü bağlar III-nitrürlerin yüksek kimyasal kararlılığa da sahip olmalarından sorumludur. Bu iyi bir özellik olduğu kadar da kötü bir özelliktir. Bu özelliği aşındırıcı ve yakıcı ortamlarda çalışan cihaz yapımında neredeyse eşsiz olmasına sebep iken aynı

zamanda bilinen işleme yöntemleri ile işlenebilirliğini azaltması sebebiyle zorluk çıkarır. Günümüzde, genel olarak incelenen c-yüzlü GaN kristalini aşındırabilecek ıslak bir aşındırıcı bulunmamaktadır. Güçlü Ga-N bağları çoğu aşındırıcıda gerçekleşen oksidasyon mekanizmasını olanaksız kılmaktadır. En güçlü asitler bile sadece yüzeydeki oksit tabakasını kaldırabilmektedir. AlN için ise az sayıda aşındırıcı bulunmaktadır. Reaktif İyon Aşındırma (RIE) gibi yöntemler, bir plazma içindeki yüksek enerjili iyonları fiziksel olarak malzemeye çarptırıp bağları koparma yöntemi ile çalışır. Bu gibi yöntemler, Cl-temelli kimyasallar ile III-nitrür aşındırmada kullanılırlar (S.J. Pearton, 1999). Bu yöntemin dezavantajı, özellikle GaN için yüksek aşındırıcılığa (0,7mm/dk) sahip olmasıdır (S.A. Smith, 1997). Bu yüzden aşındırılan yüzeyde bozukluklar oluşabilmektedir. AlGaIn/GaN çoklu yapılarında bu tür bozukluklar cihaz performansında sorunlara yol açabilir.

1.2.3. Materyal Parametreleri

III- Nitritlerden en önemlisi olan GaN için oda sıcaklığındaki genel parametreler Çizelge 1.4’ de gösterilmiştir (Lişesivdin, 2008).

Çizelge 1.4: GaN’ e ait 300 K’de ki temel parametreler.

ÖZELLİK	GaN
Kristal yapısı	Hekzagonal
Simetri grubu	$P6_3mc(C_{6v}^4)$
cm ³ ’deki atom sayısı	$8,9 \times 10^{22}$
Debye sıcaklığı	600 K
Yoğunluğu	$6,15 \text{ gcm}^{-3}$
Kırılma alanı	$5 \times 10^6 \text{ Vcm}^{-1}$
Elektron hareketliliği	$\leq 1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
Deşik hareketliliği	$\leq 200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
Elektron difüzyon katsayısı	$\leq 25 \text{ cm}^2/\text{s}$
Deşik difüzyon katsayısı	$\leq 5 \text{ cm}^2/\text{s}$
Elektron ısı hızı	$2,6 \times 10^5 \text{ m/s}$
Deşik ısı hızı	$9,4 \times 10^4 \text{ m/s}$
Dielektrik sabiti (statik)	8.9
Dielektrik sabiti (yüksek frekans)	5,35
Elektron etkin kütlesi	$0,2 m_o$
Deşik etkin kütlesi	$1.25 m_o$
Ağır deşik etkin kütlesi	$1,4 m_o$
Hafif deşik etkin kütlesi	$0,3 m_o$
Elektron ilgisi	4,1 eV
Örgü sabiti (a)	0,3189 nm
Örgü sabiti (c)	0,519 nm
Optik fonon enerjisi	91,2 meV

Isıl iletkenlik katsayısı (<i>a</i> için)	$5,59 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Isıl iletkenlik katsayısı (<i>c</i> için)	$3,17 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
LA-fonon hızı	$6,56 \times 10^3 \text{ ms}^{-1}$
Elektron dalga vektörü	$7,3 \times 10^8 \text{ m}^{-1}$
Elektromekanik çiftlenim katsayısı	0,039
LA elastik sabiti	$2,65 \times 10^{11} \text{ Nm}^{-2}$
TA elastik sabiti	$0,44 \times 10^{11} \text{ Nm}^{-2}$
Doğal polarizasyon	$-0,029 \text{ C/m}^2$
e_{33}	$0,73 \text{ C/m}^2$
e_{31}	$-0,49 \text{ C/m}^2$
Bir atomun hacmi	$3,48487 \times 10^{-29} \text{ m}^3$

2. BÖLÜM

2.1. Metal Yarıiletken Kontaklar

Metal-yarıiletken kontaklar hakkındaki bilgimiz Braun'nun (1874) ilk çalışmasına kadar uzanır. Braun, bakır ve demir sülfat gibi yarıiletkenler ile metal kontaklar arasında elektriksel iletimin asimetrik tabiatını ortaya çıkardı. Doğrultma mekanizması anlaşılmamasına rağmen, metal noktalar ve metalik sülfatlar arasındaki kontaklar radyo ile ilgili ilk deneylerde detektör olarak yaygın şekilde kullanıldı. 1906 yılında Pickard silisyumu kullanarak nokta kontak detektör için patent aldı; 1907 yılında ise Pierce, çeşitli yarıiletkenler üzerine metalleri püskürterek yapılan diyotların doğrultma karakteristiğini yayımlattı. 1920'lerde yayımcılığın hızlı büyümesi, genellikle kurşun sülfatlı bir kristal ile tungsten nokta kontaklı ibaret doğrultuculara borçludur. İlk bakır oksit plaka (levha) doğrultucular, yaklaşık olarak aynı zamanda ortaya çıktı (E.H. Rhoderick, 1988).

Metal-yarıiletken kontakların doğrultma işleminin anlaşılması doğrultusunda ilk adım 1931 yılında atıldı. O yıllarda, Schottky, Störmer ve Waibel herhangi bir numunedeki kontakta akım geçiyorsa o zaman kontakta bir potansiyel düşme olur, bu potansiyel düşmesi bu kontakta bir potansiyel engelinin olduğuna işaretler. Kuantum mekaniği anlaşıldığında ve 1932 yılında Wilson ve diğerleri engel boyunca elektronların kuantum mekaniksel tünellemesi ile doğrultma işlemini açıklamaya çalıştılar. Fakat bu mekanizmanın kolay akım akışının doğrultusunu yanlış tahmin ettiği fark edildi. 1938 yılında Schottky ve ondan bağımsız olarak Mott doğrultmanın gözlenen doğrultusunun; normal sürüklenme ve difüzyon işlemleriyle potansiyel engelini geçen elektronların düşünülmesi ile açıklanabileceğine işaret ettiler. Mott' a (1938) göre potansiyel engeli, metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farktan dolayı meydana gelir. Bu araştırmacı, elektrik alanın sabit ve elektrostatik potansiyelin metale yaklaşırken mesafe ile lineer olarak değişmesi için, engel bölgesinin yüklü safsızlıklardan yoksun olduğunu farz etti. Aksine Schottky (1939), metale yaklaşıldığında Poisson eşitliğine göre elektrik alanın lineer ve elektrostatik potansiyelin karesel olması için engel bölgesinin sabit yoğunluklu yüklü safsızlıklar içerdiğini farz etti. Engel şeklinin tespitinde uzay yükünün rolü hakkında benzer düşünceler Davydov (1939, 1941) tarafından ileri sürüldü (E.H. Rhoderick, 1988). Metal-yarıiletken kontaklarda ortaya atılan teorilerde Schottky ve Mott teorisi benimsenmiştir.

2.2. İş Fonksiyonu

Bir metalin iş fonksiyonu ϕ_m , bir elektronu Fermi seviyesinden metalin yüzeyinin dışına hareketsiz bir hale yükseltmek için (koparmak) gerekli olan enerji miktarıdır. İş fonksiyonu kuantum mekaniği kullanılarak elde edilirse iki kısımdan ibaret olduğu bulunur; hacim katkısı (bir elektronun diğer elektronlarla etkileşmesi kristalin periyodik potansiyelinden dolayı elektronun enerjisini temsil eder) ve yüzey katkısı (genelde metal yüzeylerde pozitif ve negatif yük merkezlerinin çakışmamasından dolayı bir dipol tabakası oluşur)'dır.

Aynı şekilde yüzeyle ilişkili rölaksasyon veya yeniden oluşumda dipol tabakalarına sebep olabilir. Ortaya çıkan dipol tabaka birim alan başına elektrik dipolün hareketine sahipse, metalin içi ve vakum arasında ρ/ϵ_0 büyüklüklü bir elektrostatik potansiyel farkı olacaktır. Elektrostatik potansiyeldeki bu değişim nedeniyle elektronun qp/ϵ_0 enerjisindeki değişim iş fonksiyon kısmını teşkil eder. Yüzey elektron yük yoğunluğundaki herhangi bir değişim, örneğin temiz metal yüzeyinde gaz atomlarının yüzeyde tutulmasıyla, dipol tabakasında ve bu yüzdede ϕ_m de bir değişime sebep olacaktır. Aynı kristalin farklı kristalografik yüzleri aynı büyüklükte olmayan yüzey dipollerinden dolayı farklı ϕ_m değerlerine sahip olabilirler. Örneğin; tungstenin (110), (100) ve (111) yüzeylerinin iş fonksiyonları 5.25, 4.63 ve 4.47 eV olarak rapor edilmiştir.

Yarıiletkenin iş fonksiyonu ϕ_s Fermi seviyesi ve vakum seviyesi arasındaki enerji farkıdır ve yüzey ve külçe katkılarından ibarettir. Yarıiletkenin iş fonksiyonu değişen bir niceliktir. Çünkü yarıiletkenin Fermi seviyesi katkılanan verici veya alıcı atomların miktarına bağlı olarak değişir (Önal, 2009). Fermi seviyesinde yarıiletken içinde müsaadeli enerji seviyelerinin olmadığında bu yolla iş fonksiyonunun tanımlanması tuhaf görülebilir. Fakat iş fonksiyonunun istatistiksel bir kavram olduğu valans ve iletkenlik bandlarından elektronu uzaklaştırmak için gerekli enerjinin ağırlıklı ortalamasını temsil ettiği hatırlanmalıdır.

Şekil 2.1' de bir n-tipi yarıiletken ve bir metalin enerji bandlarının şematik gösterimi vardır. Yarıiletkenin önemli bir yüzey parametresi de elektron ilgisidir χ_s . Bu, yüzeyin içinde iletkenlik bandının altındaki elektronun enerjisi ile yüzeyin dışındaki hareketsiz elektronun enerjileri arasındaki farktır. Elektron ilgisi yarıiletkende katkı miktarına bağlı olmayan bir parametredir (Önal, 2009). Elektron ilgisi iş fonksiyonuna

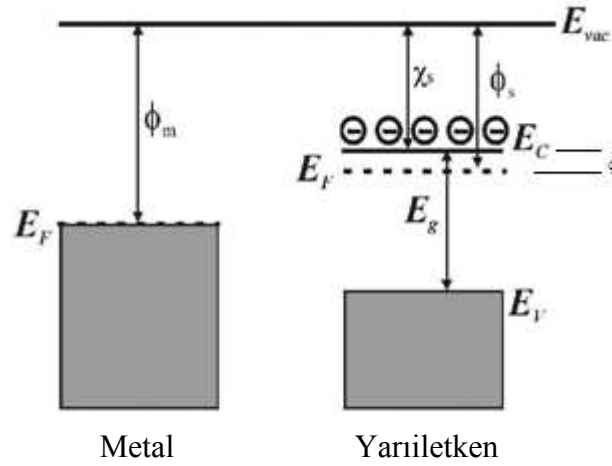
benzer durumda yüzey dipollerine duyarlıdır. Eğer bandlar düz ise (yani yarıiletken içinde elektrik alan yoksa), iş fonksiyonu ve elektron ilgisi arasındaki ilişki;

$$\phi_s = \chi_s + \xi \quad [2.1]$$

ile verilir. Burada ξ ; iletkenlik bandının altı ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkıdır. Sonuç olarak iyonizasyon enerjisi,

$$I = \chi_s + E_g \quad [2.2]$$

bağıntısıyla tanımlanır. I ; valans bandından bir elektronu uzaklaştırmak için gerekli olan minimum enerjidir (E.H. Rhoderick, 1988).



Şekil 2.1: Birbirlerinden bağımsız n-tipi yarıiletken ve bir metalin enerji bandlarının şematik gösterimi.

Oluşturulan kontakların ideal olması için, kontak olarak kullanılan metaller yeterince yüksek saflıkta ve yarıiletken kristallerin yüzeyleri de yeterince temiz olmalıdır. Metal-yarıiletken kontaklar, doğrultucu ve omik olmak üzere ikiye ayrılırlar. Kontakın omik veya doğrultucu olmasını, metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları belirler. ϕ_m metalin, ϕ_s yarıiletkenin iş fonksiyonları olmak üzere, metal-n tipi yarıiletken kontaklarda $\phi_m > \phi_s$ ise “doğrultucu kontak” ve $\phi_m < \phi_s$ olması durumunda ise “omik kontak” oluşur. Metal-p tipi yarıiletkende ise bunun tersidir (Önal, 2009). Bu durum Çizelge 2.1’ de özetlenmiştir;

Çizelge 2.1: İş fonksiyonlarına göre doğrultucu ve omik kontaklar

Kontak Türü	n-tipi	p-tipi
Doğrultucu Kontak	$\phi_s < \phi_m$	$\phi_s > \phi_m$
Omik Kontak	$\phi_s > \phi_m$	$\phi_s < \phi_m$

2.3. İdeal metal-yarıiletken kontakta Schottky-Mott teorisi

Metal-yarıiletken kontakların karakteristiklerini belirleyen birçok faktör olmasıyla birlikte, bunlardan en önemlisi metal-yarıiletken arayüzeyinde oluşan potansiyel engel yapısıdır. Arayüzey bölgesi yarıiletken tarafında oluşan ve hareketli yüklerden arınmış yüksek dirençli bir bölgedir. Bu arayüzeyde potansiyel engelinin oluşumu ile ilgili çeşitli modeller ileri sürülmüştür (Brillson, 1982). Schottky ve Mott tarafından önerilen modellere göre elektronlar, potansiyel engeli üzerinden sürüklenme ve difüzyon yolu ile geçerler. Mott' a göre potansiyel engel, metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Mott, arayüzey bölgesinde safsızlık atomlarının olmadığını ve dolayısıyla elektrik alanın sabit olduğunu, ayrıca elektrostatik potansiyelin metale kadar uzaklıkla lineer olarak değiştiğini kabul eder. Schottky ise potansiyel engel bölgesinin sabit yoğunlukta safsızlık atomları içerdiğini, elektrik alanın lineer olarak arttığını, ayrıca elektrostatik potansiyelin metale kadar Poisson denklemi ile uyum halinde kuadratik (ikinci dereceden) olarak değiştiğini ifade eder (E.H. Rhoderick, 1988).

Şekil 2.2 ise kontakta önce metal ve n-tipi bir yarıiletkenin enerji bandlarını ve kontak oluşturulup dengeye ulaşıldıktan sonraki enerji-bant diyagramını göstermektedir. Metal yarıiletkenle kontak oluşturulduğunda, metaldeki elektronlardan daha yüksek enerjiye sahip olan yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar, yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesine eşit oluncaya kadar metale doğru akar. Elektronlar yarıiletkendeki metale gittiğinde yarıiletkenin sınıra yakın bölgesinde serbest elektron konsantrasyonu azalır.

volt olup eklemde kurulan potansiyel ya da kontak potansiyel farkı olarak bilinir. qV_i yarıiletkeniden metale gidecek olan elektronun sahip olması gereken enerji yani engel yüksekliğidir. Bununla birlikte metal tarafından gözüken engel yüksekliği, yarıiletken tarafından gözüken engel yüksekliğinden farklıdır ve

$$\phi_B = \phi_m - \chi_s \quad [2.3]$$

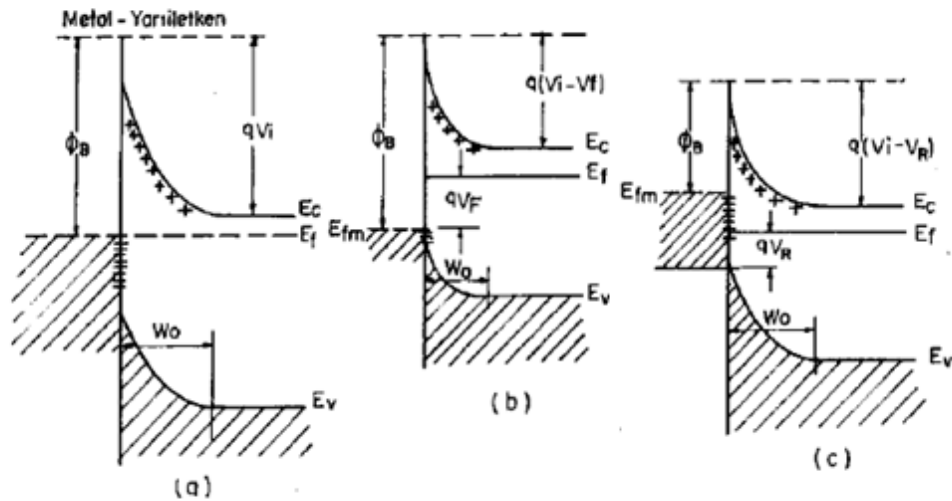
ile verilir.

$\phi_s = \phi_n + \chi_s$ ve $\phi_m = qV_i + \phi_s$ olduğundan;

$$\phi_B = qV_i + \phi_n \quad [2.4]$$

şeklinde elde edilir. Burada q elektronik yüküdür. Eşitlik 2.3, birbirlerinden bağımsız olarak Schottky ve Mott tarafından ifade edilmiştir (Sharma, 1984). Potansiyel engelinin tam biçimi, uzay yük bölgesindeki yük dağılımından hesaplanabilir. Pek çok durumda engelin ϕ_B yüksekliği, termal enerji kT/q 'dan çok büyüktür, bu durumda yarıiletkenin uzay yükü bölgesi hareketli yüklerden yoksun, yüksek dirençli yalıtkan bir tüketim bölgesi olmaya başlar. Bu sabit uzay yükleri için elektrik alanın büyüklüğü, uzay yük tabakası kenarından olan uzaklıkla lineer olarak artar, bunun sonucu olarak engel yüksekliği parabolik olur (Schottky engeli). Mott, yarıiletkende yüklerin bulunmadığı ince bir tabaka olduğunu kabul eder. Bu ince bölgede elektrik alanın büyüklüğü sabittir ve potansiyel, bölge boyunca lineer olarak artar (Mott engeli). Mott engeli, yüksek katkılanmış yarıiletken ile metal arasına az katkılanmış ya da özgül bir yarıiletken konulduğu zaman kullanılır. Şekil 2.2 (b)' de gösterilen kontak doğrultucu kontaklıdır ($\phi_s < \phi_m$). Şekil 2.3 (a) termal dengede doğrultucu kontakın enerji-bant diyagramını göstermektedir. Termal dengede, yarıiletkenden metale geçen elektronlar metalden yarıiletkene geçen elektronlar ile dengelenir ve net bir akım oluşmaz. Yarıiletkenin tüketim bölgesi çok az hareketli taşıyıcı içerdiği için, bu bölgenin direnci metalin ve yarıiletkenin nötral kısmının direnci ile kıyaslandığında çok yüksektir ve uygulanan dış voltajın tamamı bu bölgeye düşer. Uygulanan doğru veya ters ön gerilim voltajı termal denge durumundaki enerji-bant diyagramını değiştirir. Bu değişim, tüketim bölgesine düşen potansiyelin değişmesiyle ve bant bükülmelerindeki değişiklik nedeniyle oluşur. Metal/n-tipi yarıiletken kontaklarda, yarıiletken tarafı metale göre negatif olacak şekilde $V = V_F$ gerilim uygulandığında, tüketim bölgesinin genişliği azalır. Şekil 2.3 (b)' de gösterildiği gibi termal dengedeki potansiyel engel yüksekliği, qV_i ' den

$q(V_i - V_F)$ ' ye azalır. Bu durumda yarıiletken den metale geçecek elektronlar azalmış bir engel ile karşılaşacaklar, bunun sonucu olarak da yarıiletken den metale doğru olan elektron akımı termal denge değerine göre artacaktır. Metalden yarıiletkene elektron akımı termal denge değerine göre değişmez. Bunun nedeni metalde herhangi bir gerilim düşmesi oluşmadığından, ϕ_B uygulanan voltajdan etkilenmez. Sonuç olarak yarıiletken taraf negatif, metal pozitif olacak şekilde kontağa bir potansiyel uygulandığı zaman, yarıiletken den metale doğru olan net bir akım vardır. Bu durumda eklem den doğru beslemede olduğu söylenir. Doğru besleme akımı, uygulanan V_F voltajı ile üstel olarak artar (E.H. Rhoderick, 1988). Ters beslemede kontağın enerji-bant diyagramı Şekil 2.3 (c)' de verilmektedir. Yarıiletken metale göre pozitif olacak şekilde $V = -V_R$ voltajı uygulanmıştır. Tüketim bölgesindeki potansiyel qV_i ' den $q(V_i + V_R)$ ' ye artmaktadır. Yarıiletken den metale doğru elektron akımı termal denge durumuna göre azalır. Metalden yarıiletkene elektron akımı ise pratik olarak termal dengedekinin aynısı olur, değişmez kalır. Yarıiletken den metale doğru olan akım doğru beslemedeki ile kıyaslandığında daha küçüktür. Böylece bu tartışmalar ışığında bahsedilen kontak tek yönde akım ileten doğrultucu kontak şeklinde tanımlayabiliriz.

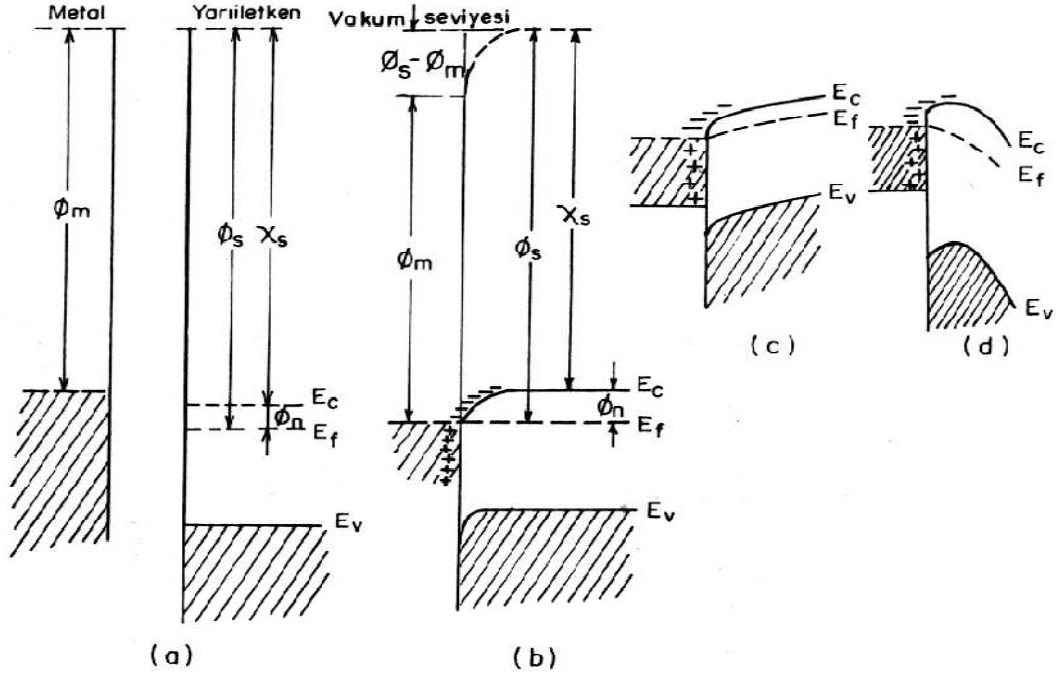


Şekil 2.3: Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak için elektron enerji-bant diyagramı
(a) Termal denge durumu (b) doğru besleme (c) ters besleme.

Şekil 2.3 (b) ve (c)' deki enerji-bant diyagramları denge şartlarında değildir ve tek bir Fermi seviyesi yoktur. Elektronların gittiği bölgenin Fermi enerji seviyesi, elektronların geldiği bölgenin Fermi enerji seviyesinden daha yüksektir.

Bir omik kontak doğrultucu olmayan bir kontakdır. Kontakın akım gerilim karakteristikleri Ohm yasasına ($V=I R$) uyar ve kontak direnci mümkün olduğu kadar küçük olmalıdır. Metal ile bir n-tipi yarıiletken bir malzeme kontak oluşturduğunda n-tipi yarıiletkenin enerji bantları kontak yakınında bükülür. Bandın bükülme miktarı ve yarıiletkendeki genişliği çok küçüktür. Sonuçta metal ile yarıiletken arasında bir potansiyel engeli yoktur ve elektronlar kontak boyunca serbestçe akabilirler. Bu tür bir kontak omik kontakdır (Aydoğan, 2011).

Şekil 2.4' de $\phi_m < \phi_s$ olan n-tipi yarıiletken ile oluşturulan omik kontakın enerji-bant diyagramı gösterilmektedir. Şekil 2.4 (a), malzemeler ayrı durumda iken enerji-bant diyagramı gösterilmiştir. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontak oluşturulduktan sonra elektronlar arkalarında pozitif yükler bırakarak, metalden yarıiletkenin iletkenlik bandına doğru akarlar ve sınırın yarıiletken tarafında elektronların yığılmasına sebep olurlar. Termal dengeye ulaşıldığında yarıiletkenin Fermi seviyesi Şekil 2.4 (b)' de gösterildiği gibi $(\phi_s - \phi_m)$ kadar yükselir. Yarıiletkende negatif yüklerin yığılması ile oluşan tabaka Debye mesafesi kadar bir kalınlık içinde sınırlanır ve bunlar yüzey yükleridir. Metaldeki elektronların konsantrasyonu çok fazla olduğu için metal tarafındaki pozitif yükler, metal-yarıiletken arayüzeyinden yaklaşık $0,5 \text{ \AA}$ bir uzaklık içinde sınırlanmış olan yüzey yükleridir. Yarıiletken içinde oluşan bir tüketim bölgesi yoktur ve yarıiletkenden metale ya da tersi yönde elektronların akması için bir potansiyel engeli yoktur. Arayüzey yakınındaki bölgede elektron konsantrasyonu artırılır ve sistemin en yüksek dirençli bölgesi yarıiletken bölgesinde oluşur. Şekil 2.4 (c) ve (d)' de doğru ve ters beslemde yarıiletken bölgesini göstermektedir. Akımın bu bölgenin direnci ile belirleneceği açıktır ve uygulanan voltajın yönünden bağımsızdır. Böyle doğrultucu olmayan kontaklar, omik kontak olarak isimlendirilir (Tekeli, 2009).



Şekil 2.4 : $\phi_s > \phi_m$ için metal/n-tipi yarıiletken omik kontakın elektron enerji-bant diyagramı. (a) Birbirinden ayrı nötral materyaller; (b) termal dengede kontak; (c) yarıiletken doğru beslemede ve (d) yarıiletken ters beslemede.

3. BÖLÜM

3.1. FOTOLİTOGRAFİ

Litografi yarıiletken fabrikasyonunda numunenin yüzeyinde geometrik şekiller oluşturmamıza olanak sağlayan temel ve önemli bir işlemdir (Jones, 2008). “*Resist*” olarak adlandırılan özel kimyasal çözelti her bir litografi yöntemi için gereklidir. Fotolitografi tekniğinde, fotoresist olarak adlandırılan UV ışığa duyarlı “*resist*” şekil bilgisi için kullanılır. Fotolitografi işlemindeki adımlar yüzey hazırlama, fotoresist kaplama (spinner kullanarak), hafif fırınlama (soft-bake) işlemi, foto-maske ayarlama, UV ile uyarma, geliştirme (development), katılaştırma (hard-bake) işlemi, aşındırma (etching), metalizasyon, kaldırma (Lift off) ve tavlama (annealing) olarak sıralayabiliriz. Bu adımlardan kısaca aşağıda bahsedilecektir. Bu işlemleri yaptıktan sonra numune kontak almaya artık hazırdır.

3.1.1. Temizleme

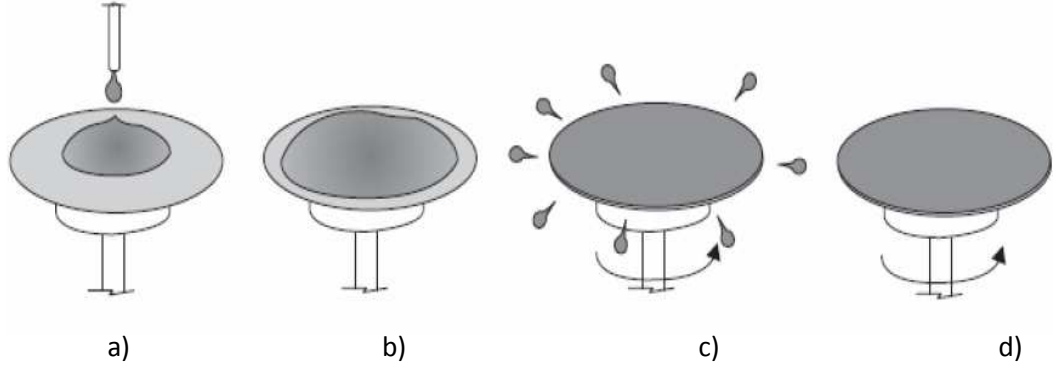
İşlem başlangıcında üç çözücü temizleme işlemi yapılmalıdır. Bu işlem sırasında trichloroethane, aseton ve isopropanol kullanılır. Burada trichloroethane; yağı, aseton; fotoresist, organik molekülleri ve trichloroethane’i, isopropanol ise acetonu çözer. Burada sırasıyla şu işlemler yapılır; numune teflon bir sepetin içine konularak 2 dk boyunca kaynayan trichloroethane içine daldırılır daha sonra oda sıcaklığındaki aseton içinde 5 dk bekletilir ve daha sonra 2 dk boyunca kaynayan isopropanol içine daldırılır. Bu işlemlerden sonra numune iyonsuz suya (deionized water, DI) maruz bırakılıp azot tabancası ile kurutulur.

3.1.2. Fotoresist Kaplama

Numune yüzeyi temizlendikten sonra fotoresist kaplanır. Yeterince uzun dönme zamanı için, mikron cinsinden kaplanan resistin kalınlığı;

$$t = k \frac{p^2}{w^{1/2}} \quad [3.1]$$

ile verilir (Jones, 2008). Burada k dönme sabitidir ve tipik olarak 80-100 dür, p resist katkı yüzde içeriğidir ve w ise rpm/1000 (rotation per minute) deki dönme hızıdır. Dönme-kaplama işleminin adımları aşağıdaki Şekil 3.1’ de ki gibi sıralanmıştır.



Şekil 3.1 : Dönme-kaplama işleminin adımları. a) Fotoresist kontrollü biçimde numune yüzeyine dağıtılır, b) numune boyunca fotoresistin dağılmasına izin verilir, c) kaplayıcının dönme hızı hızlı bir biçimde artırarak fazla fotoresist numune üzerinden atılır, d) ince bir fotoresist tabakası oluşturmak için yüksek hızda döndürülür (Jones, 2008).

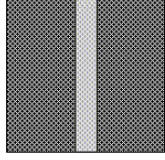
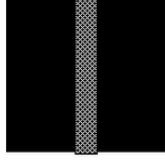
3.1.3. Hafif Fırınlama (Soft-Bake)

Döndürme işlemi yaptıktan sonra numune üzerindeki fotoresisti yoğunlaştırmak için ısıtıcı üzerinde 30 – 60 sn için 80 – 100 °C’ de bekletilerek yapılır. Fırında ise bu süre 30 dakikadır. Soft - bake’ in amacı fotoresisti yarı sert hale getirmektir.

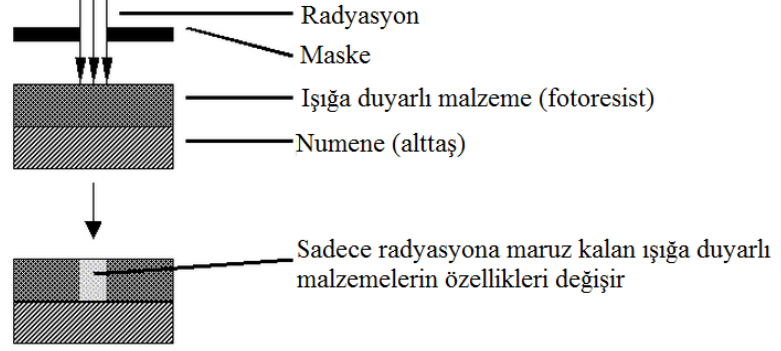
3.1.4. Foto-Mask Ayarlama, UV’ ye Maruz Bırakma ve Kaldırma (Development)

Numuneye soft bake yapıldıktan sonra üzerine yapılması gereken maske, maske ayarlama ile ayarlandıktan sonra UV ışığa maruz bırakılır. Işığa duyarlı malzeme bir radyasyon kaynağına maruz kaldığında onun fiziksel özelliği değişen malzemedir. Işığa duyarlı bir malzemeyi seçici olarak radyasyon etki ettirirsek, materyal üzerine gelen ışığın maruz bırakıldığı yere göre farklılıklar gösterir. Işığın geldiği yerle ışığın maruz kalmadığı yerin fiziksel özellikleri farklıdır. Şekil 3.2’ de bu işlemler görsel biçimde gösterilmiştir.

Üsten Görünüm

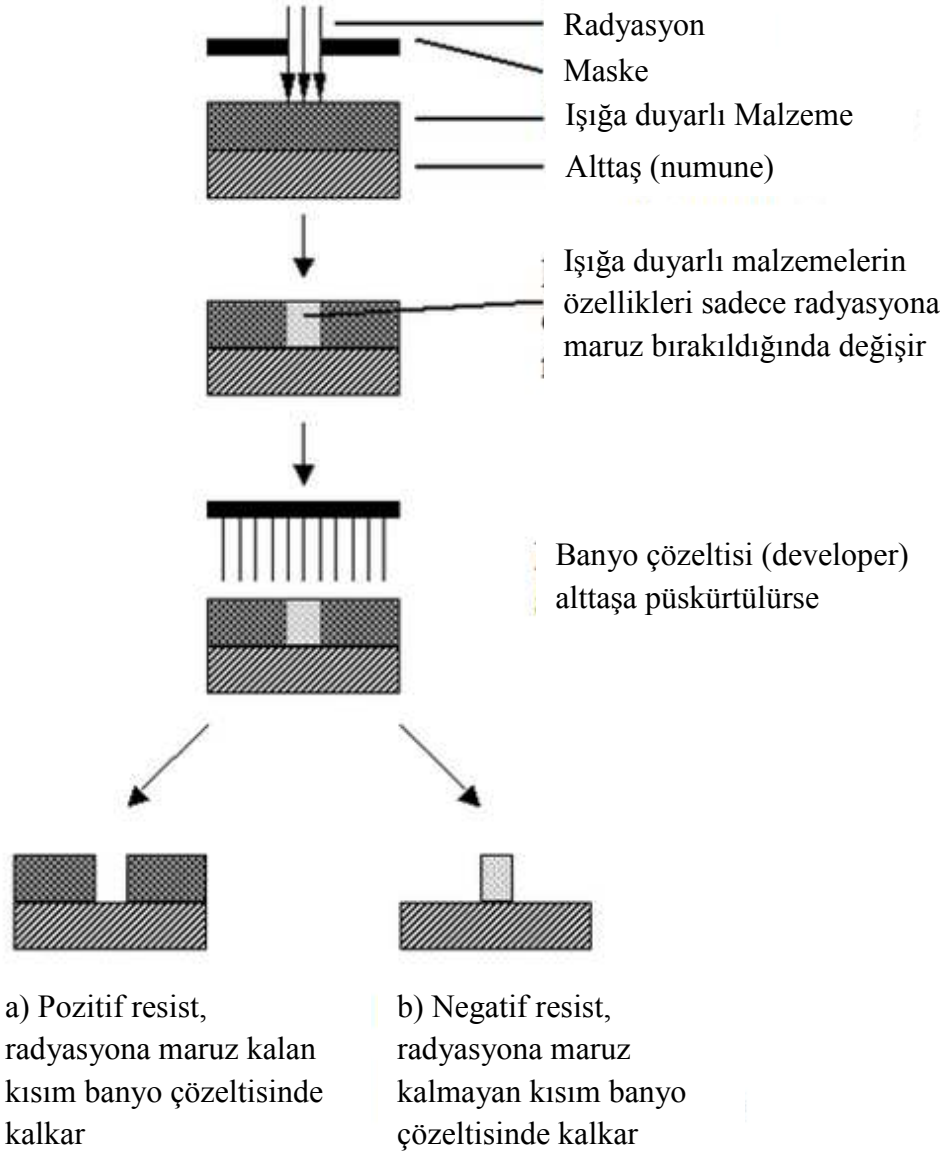


Yandan Görünüm



Şekil 3.2 : Işığa duyarlı bir malzemeye radyasyonun etkisi.

Kullanılan ışığa duyarlı malzemeler tipik olarak fotoresisttir. Resist özel dalga boylu bir radyasyon kaynağına maruz bırakıldığında resist banyo çözeltisinde (developer) resistin kimyasal direnci değişir. Resist bir ışık kaynağına maruz bırakıldıktan sonra bir banyo çözeltisine konulursa, resistin iki bölgesinden (radyasyona maruz kalan yerle, kalmayan yer) herhangi birinde kimyasal bozulma olur. Maruz kalan kısım banyo sayesinde çözülüyorsa ve maruz kalmayan kısım çözünmüyorsa, materyal pozitif resist olarak düşünülmektedir (Şekil 3.3-a). Eğer radyasyon kaynağına maruz kalan kısım bir banyo çözeltisinde çözülüyorsa, radyasyon kaynağına maruz kalmayan kısım kimyasal bozunuyorsa, materyal negatif resist olarak düşünülmektedir (Şekil 3.3-b).



Şekil 3.3 : a) Pozitif resist, b) Negatif resist.

3.1.5. Katılaştırma (Hard- Bake) İşlemi

Kaldırma (development) işleminden sonra fotolitografinin bir sonraki adımı hard-bakedir. Hard – bake işlemi ısıtıcıyı kullanarak 10 dakika boyunca 120 °C civarındaki sıcaklıklarda yapılır. Bu işlem fotoresisti sabitleştirmek ve daha sert fotoresist yapmak için ve kaplama çözücüsünün atıklarını ve kaldırma işleminde kullanılan kimyasal çözücü atıklarını buharlaştırmak için yapılır. Diğer yandan hard – bake resistin numune yüzeyine yapışmasını sağlar ve resisti kaldırmak daha zor olur.

3.1.6. Aşındırma (Etching)

Aşındırma işlemi tanımlanan şekli yarıiletken ya da dielektrik katmanlarda oluşturmak için kullanılır böylece bir sonraki işlem (metelizasyon, yalıtım vb.) için arzu edilen

düzleme ulaşılmış olunur. İnce fotoresist ve dielektirik filmler için de kullanılır. Yarıiletken işlemlerinde başlıca iki tip aşındırma kullanılır. Bunlar ıslak (wet) ve kuru (dry) aşındırmadır. Islak aşındırma kimyasal çözeltiler vasıtasıyla yapılır. Kuru aşındırma ise genellikle reaktif iyon aşındırma (reactive ion etching: RIE) ile yapılmaktadır.

III-Nitrit materyal sistemi için her hangi bir ıslak aşındırma rapor edilmediği için III-Nitritler çoğu zaman RIE metoduyla aşındırırlar. RIE tekniğinde, III-Nitrit filmler numune yüzeyine yüksek enerjili plazma iyonlarını çaptırarak aşındırırlar. Çok yüksek vakumlu (UHV) RIE makinesi bu işlem için kullanılır. Literatürde III-Nitritleri aşındırmak için en yaygın olarak klor (Cl) tabanlı gazlar kullanılır.

3.1.7. Metalizasyon ve Kaldırma (Lift-Off)

Metal biriktirme vasıtasıyla Schottky, omik ve birbirine bağlı metal ya da metal grupları oluşturulur. Metal alaşımlı filmler çok yüksek vakumlu kaplayıcı sistemde termal buharlaştırma kullanarak numune yüzeyine biriktirir. Katı ya da toz şeklindeki metaller tungsten botlar içine konulur. Numune botların üstüne yerleştirilmiş bir numune tutucuya bağlanır. Haznede oluşturulan yeterli vakumdan (tipik olarak $4-6 \times 10^{-6}$ mbar) sonra tungsten bot boyunca akım geçirerek istenilen metaller buharlaştırılır. Her bir metalizasyon farklı buharlaştırma oranlı farklı reçetelere sahiptir.

Metalizasyon işleminin sonucunda numune yüzeyinde fotoresist ve ince metal film vardır. Metalizasyondan sonra numune aseton içine konulur. Aseton fotoresisti kaldırır dolayısıyla fotoresist üzerine biriken metal kısımda kalkacaktır. Diğer bir yandan numune yüzeyinde fotoresistin olmadığı yerlerdeki metal bölgeler kalacaktır. Sonuç olarak numune yüzeyinde sadece fotoresistin olmadığı yer, yani maske sayesinde oluşturulmak istenilen bölgelerde metal kalır. Özellikle ince metalizasyon için, kaldırma aseton içinde tamamlanmazsa, ultrason metodu metal parçaları yıkmak için kullanılır. Fakat bu her zaman riskli bir işlemdir çünkü numune yüzeyinde kalması gereken metal bölgeleri yıkabilir ve zarar verebilir. Dolayısıyla çok dikkatli ve kısa süreli zamanlama ile kullanılmalıdır.

3.1.8. Tavlama

Hızlı ısısal tavlama (Rapid Thermal Annealing: RTA) omik kontak oluşturmak için hızlı bir biçimde numuneyi çok yüksek sıcaklıklara (maksimum 1400°C) ısıtan termal bir işlemdir. RTA düşük dirençli omik kontak oluşturmak için gereklidir. Tavlama için, bir flaş lambası olan bir RTA sistemi kullanılır. Numune kısa bir zaman için flaş lambanın

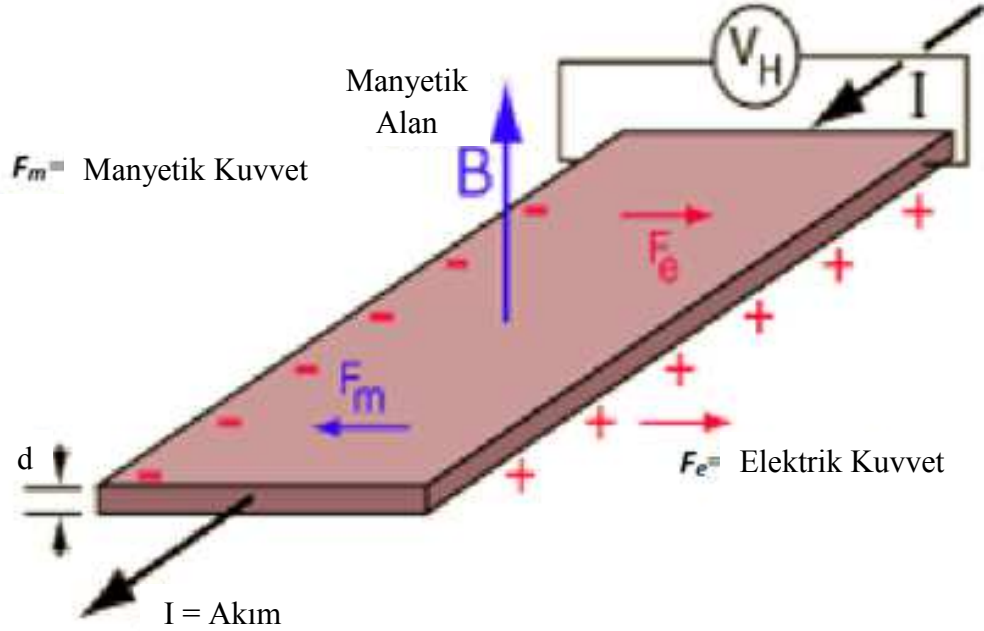
radlyasyonu altında ısıtılır. Yüksek sıcaklık sayesinde, omik alaşımlar erimeye başlar ve omik metaller numune içine nüfuz eder. Sonuç olarak metal ile yarıiletken yüzey de omik kontak oluşur.

4. BÖLÜM

4.1. HALL OLAYI ve NUMUNE GEOMETRİLERİ

4.1.1. Hall Olayı

Akım, manyetik alandaki bir iletken boyunca akarsa, manyetik alan, hareket eden yüklü parçacıklara hareket doğrultusu ve manyetik alana dik olacak şekilde bir kuvvet uygular. Şekil 4.1’ de gösterilen manyetik kuvvet, bu kuvvet iletkenin bir kenarına yüklü taşıyıcıları itme eğilimindedir. İletkenin kenarındaki yük yığılması iletkenin iki kenarı arasındaki oluşan ölçülebilir voltaj ile dengelenecektir. Bu ölçülebilir enine voltajın varlığı 1879 da E. H. Hall tarafından keşfedildikten sonra Hall olayı olarak adlandırılmıştır.



Şekil 4.1: Bir metale I akımı uygulandığında oluşan kuvvetler ve yönleri.

Hall olayının temel prensibi bir B manyetik alandaki bir numuneden bu manyetik alana dik bir I akımı geçirildiğinde, taşıyıcı yükler Lorentz kuvveti sayesinde akım hattından saparlar. Lorentz kuvveti;

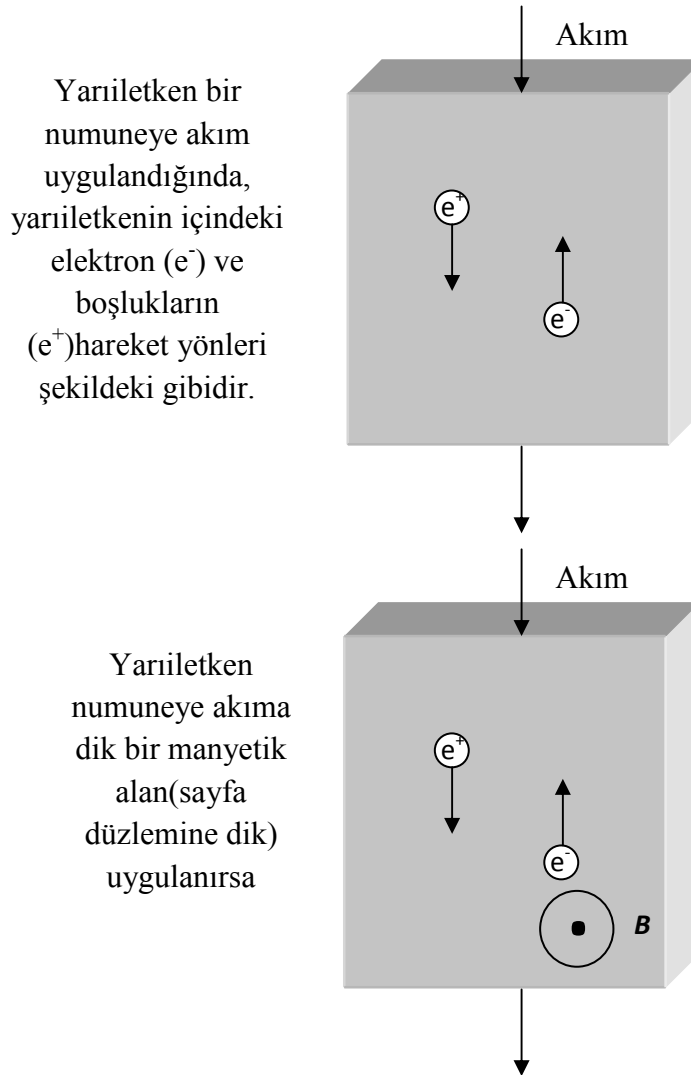
$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} \quad [4.1]$$

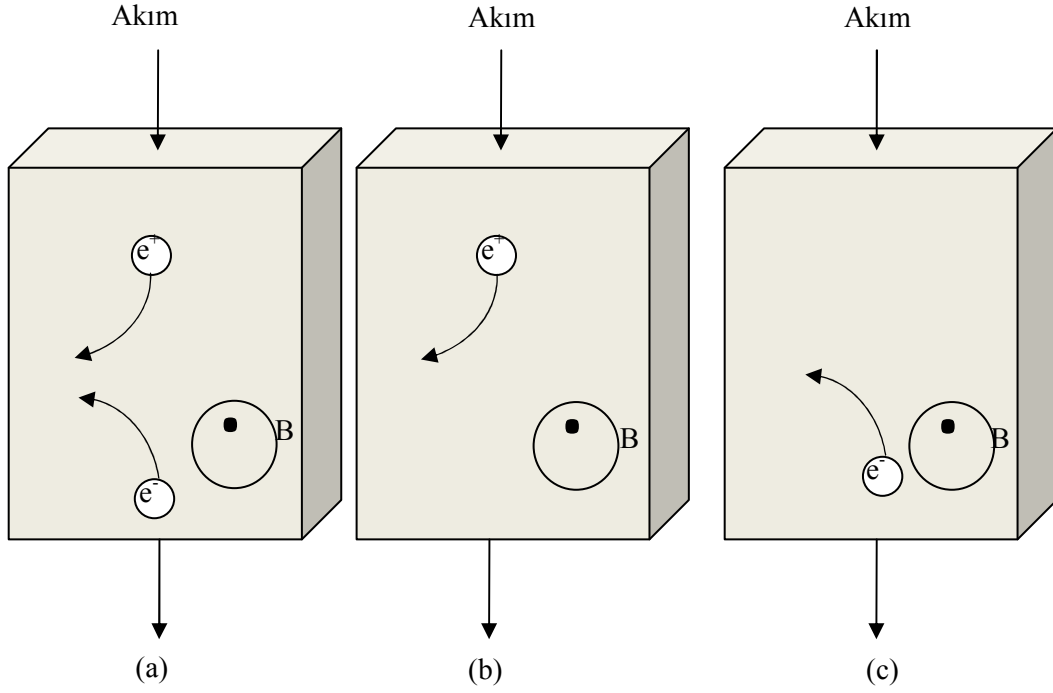
ile verilmektedir. Bu kuvvetin sayesinde sonuç olarak uygulanan akıma dik bir şekilde bir potansiyel düşmesi oluşur. Bu potansiyel düşmesi Hall voltajıdır ve aşağıdaki gibi ifade edilir (M.J. Deen, 2006).

$$V_H = \frac{IB}{ned} \quad [4.2]$$

burada n birim hacimdeki yük sayısı ve e elektron yüküdür.

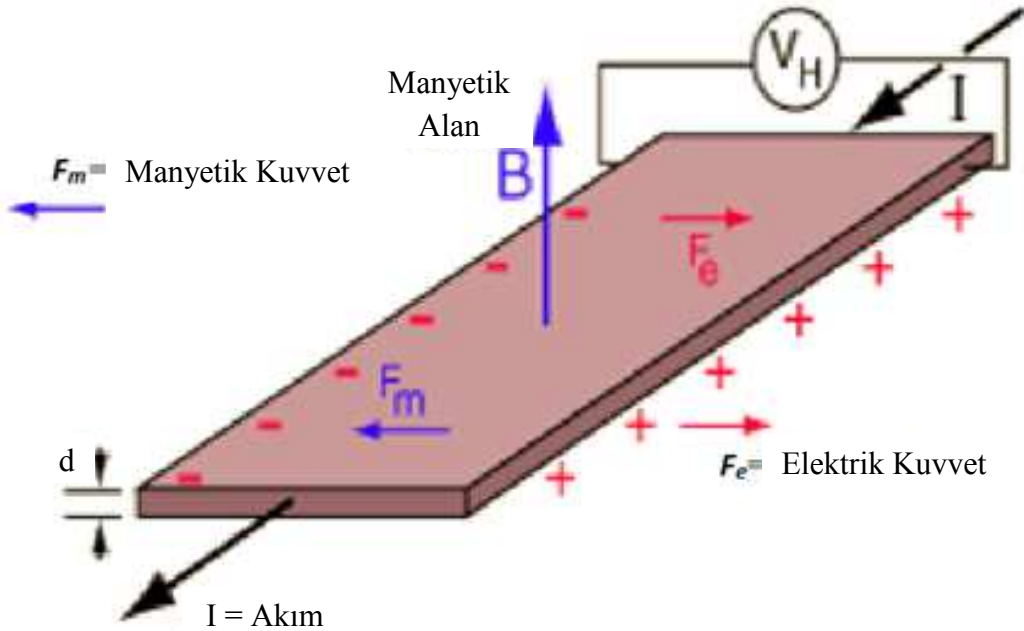
Hall olayı farklı yüklü taşıyıcılar için farklı olan iletim olayıdır. Çoğu yaygın elektrik uygulamalarında, klasik akım hareket eden negatif ya da pozitif yükler olarak düşünüldüğü için her hangi bir farklılık yapmadığı için kısmen kullanılır. Fakat Hall voltajı pozitif ve negatif yük taşıyıcıları için farklı bir kutupluluğa sahiptir ve Hall voltajı yarıiletkenlerde, negatif ve pozitif yük taşıyıcılarının bir kombinasyonu gösteren diğer materyallerdeki iletimin detaylı çalışmaları kullanılmalıdır. Yarıiletkenlerde (asal, n-tipi ve p tipi) Hall voltajının oluşumunda etkili olan elektron ve boşlukların hareketi Şekil 4.2' de verilmiştir.





Şekil 4.2 :a)Asıl yarıiletken b) p tipi yarıiletken c) n tipi yarıiletken de elektron ya da boşluğun hareketi.

Özel olarak p-tipi yarıiletkendeki taşıyıcılar için Hall voltajını inceleyecek olursak, Şekil 4.3' de p-tipi bir yarıiletkendeki kuvvetler ve bu kuvvetlerin yönleri gösterilmektedir (Armen, 2007).



Şekil 4.3 : p-tipi bir yarıiletkende oluşan kuvvetler ve yönleri.

Şekil 4.3' deki manyetik kuvvet ifadesi;

$$F_m = ev_d B \quad [4.3]$$

şeklinde verilmektedir. Burada v_d yüklerin sürüklenme hızıdır. Akımın sürüklenme hızı açısından ifadesi;

$$I = neAv_d \quad [4.4]$$

şeklindedir. Akım ifadesinden sürüklenme hızını çekip manyetik alan ifadesinde yerine yazarsak yeni ifademizi;

$$F_m = \frac{eIB}{neA} \quad [4.5]$$

biçiminde elde etmiş oluruz. Denge anında elektrik kuvvet manyetik kuvvete eşittir ve

$$F_e = F_m = \frac{V_H e}{w} = \frac{eIB}{neA} \quad [4.6]$$

ifadesi ile verilir. Burada manyetik kuvveti yerine yazarsak, p-tipi bir yarıiletken için Hall voltajını;

$$V_H = \frac{IB}{ned} \quad [4.7]$$

biçiminde elde ederiz.

4.1.2. Termoloji

Tüm durumlarda, voltajlar volt cinsinden, elektrik akımları amper cinsinden ve dirençler ohm cinsinden ölçülmektedir. Voltaj ve akım aşağıdaki şekilde gösterilir;

4.1.2.1. Voltaj Gösterimi

$V_{ij,kl}^+(B)$, uygulanan B manyetik alan altında, akım i den j' ye doğru aktığında k ve l bağlantıları arasında ölçülen voltaj farkı $V_k - V_l$ ' yi gösterir. $V_{ij,kl}^-(B)$, uygulanan B manyetik alan altında akım j den i' ye doğru aktığında k ve l bağlantıları arasında ölçülen voltaj farkı $V_k - V_l$ ' yi gösterir.

4.1.2.2. Akım Gösterimi

$I_{ij}^+(B)$ uygulanan manyetik alan altında, akımın i den j' ye doğru aktığını gösterir.

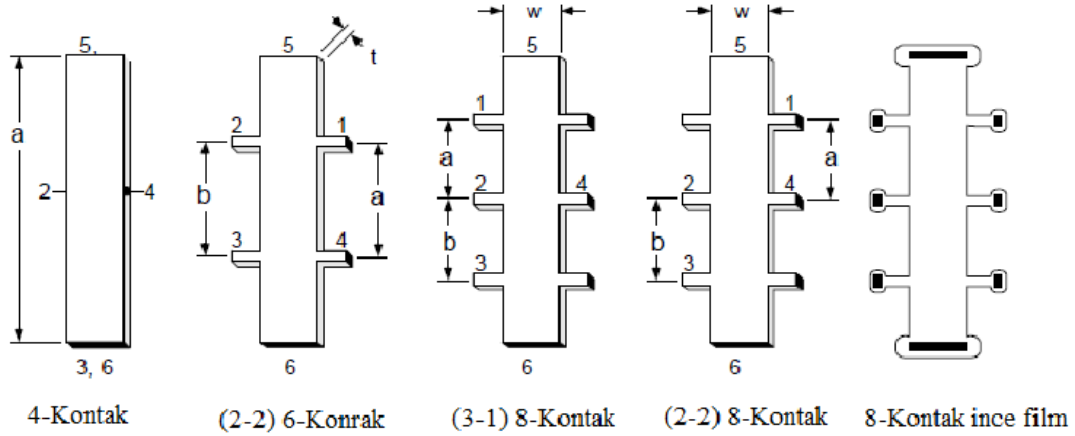
$I_{ij}^-(B)$ ise uygulanan manyetik alan altında, akımın j den i' ye doğru aktığını gösterir.

4.1.3. Numune Geometrileri

Hall olayı ölçümleri yaygın olarak iki numune geometrisi kullanılır. Bunlar Hall çubuk geometrisi ve Van der Pauw geometrisidir. İkisinin de avantajları ve dezavantajları vardır. Her iki numune geometrisinde de, Hall voltajı uygulanan manyetik alana ve akıma dik bir şekilde oluşur.

4.1.3.1. Hall Çubuk Geometrisi

Yaygın olarak kullanılan Hall çubuk geometrileri Şekil 4.3' de verilmiştir.



Şekil 4.4 : Yaygın olarak kullanılan Hall çubuk geometrileri, t = nüfuz edilen katman kalınlığı, buradaki siyah kısımlar kontaklardır.

Hall voltajı Şekil 4.4' deki gibi numaralandırılmış 8-kontaklı Hall çubuk kontaklı geometri boyunca geliştirildi.

$$V_H = V_{24} = \frac{R_H B I}{t} \quad [4.8]$$

Burada V_{24} 2 ve 4 olarak numaralandırılmış karşı kontaklar arasında ölçülen voltaj, R_H materyalin Hall katsayısı, B uygulanan manyetik akı yoğunluğu, I akım ve t B' ye dik yöndeki numunenin kalınlığıdır. Verilen bir numune için, artan manyetik alan (B), akım (I) ve azalan numune kalınlığı ile Hall voltajı artar.

Yüklü taşıyıcı yoğunluğu, yüklü taşıyıcı tipi ve Hall katsayısı arasındaki ilişki karmaşık olabilir, fakat $B \rightarrow \infty$ limitinde incelenirse daha faydalı bir ilişki çıkarılabilir. Bu durumda Hall katsayısı,

$$R_H = \frac{r}{q(p-n)} \quad [4.9]$$

olur. Burada r Hall saçılma faktörü, q temel elektrik yükü, p ve n sırasıyla materyaldeki pozitif ve negatif yük taşıyıcılarıdır. Tek bir baskın taşıyıcılı materyal durumu için, Hall

katsayısı yük taşıyıcısının tersi ile orantılıdır. Saçılma faktörü r materyalde ki saçılma mekanizmasına bağlıdır ve tipik olarak 1 ve 2 arasında uzanır.

Diğer sıklıkla ilgilenen nicelik taşıyıcı mobilitesidir. Taşıyıcı mobilitesi;

$$\mu_H = \frac{|R_H|}{\rho} \quad [4.10]$$

ile verilmektedir. Burada μ_H Hall mobilitesi ve ρ sıfır manyetik alandaki öz dirençtir. Öz direnç Şekil 4.4' de gösterilen numunelerin 5 ve 6 numaralı kontakları arasına uygulanan akım ve 1 ve 3 numaralı kontaklar arasından ölçülen voltaj sayesinde hesaplanabilir. Formül formatında yazacak olursak;

$$\rho(B) = \frac{V_{13}}{I_{56}} \frac{wt}{b} \quad [4.11]$$

ile verilmektedir. Burada w Hall çubuğunun genişliği, t Hall çubuğunun kalınlığı, b 1-3 kontakları arasındaki mesafe ve B ölçüm sırasındaki numuneye uygulanan manyetik alandır. Numune boyunca uygulanacak voltajın yaklaşık yarısı voltaj ölçüm kontakları arasında ortaya çıktığı için, Hall çubuğu direnç ölçümü almak için iyi bir geometridir. Bu sebepten, benzer geometrili Hall çubukları yaygın olarak düşük dirençli numunelerde magnetodirenç ya da Hall mobilitesi ölçümünde kullanılır.

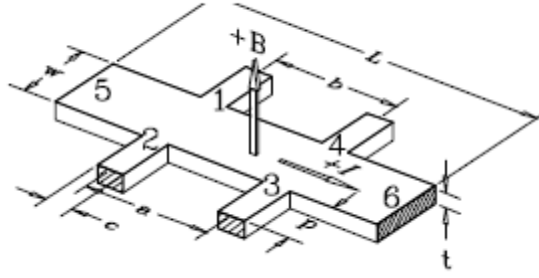
Hall çubuklu geometrilerin dezavantajları, mobilite ölçümü yapmak için en az 6 kontak gereklidir, doğru öz direnç ölçümü numune geometrisine duyarlıdır, Hall çubuğunun genişliği ve kenar kontaklar arasındaki mesafeyi doğru olarak ölçmek zor olabilir. Doğruluk numune kollarının sonlarından ya da kenarlarından alınan kontaklarla artırılabilir.

4.1.3.2. Hall Çubuk Ölçümleri

Hall çubuk geometrileri Hall olayı ölçümleri için ideal bir yaklaşımdır.

4.1.3.2.1. 6-Kontaklı (1-2-2-1) Hall Çubuğu

İdeal 6 kontaklı 1-2-2-1 Hall çubuk geometrisi simetriktir. Şekil 4.5, 6 kontaklı 1-2-2-1 Hall çubuk geometrisi verilmiştir.



Şekil 4.5 : 6-kontaklı 1-2-2-1 Hall çubuk geometrisi.

Numunenin her bir kenarındaki a ve b kontak ayrımları eşittir. Kontak çiftleri numunenin uzun ekseninin yaklaşık olarak orta noktalarına simetrik olarak yerleştirilmiştir.

Bu geometri hem özdirenç hem de Hall katsayısındaki numune homojenliğini kontrol etmek için iki eşit ölçüm setine olanak sağlar.

4.1.3.2.1.1. Özdirenç Hesabı

Sıfır manyetik alanda özdirenci hesaplamak için, ilk hesap;

$$\rho_A = \frac{V_{56,23}^+(B=0) - V_{56,23}^-(B=0)}{I_{56}^+(B=0) - I_{56}^-(B=0)} \frac{w t}{b} [\Omega. \text{cm}] \quad [4.12]$$

ve

$$\rho_B = \frac{V_{56,14}^+(B=0) - V_{56,14}^-(B=0)}{I_{56}^+(B=0) - I_{56}^-(B=0)} \frac{w t}{b} [\Omega. \text{cm}] \quad [4.13]$$

olarak verilir.

Bu iki özdirenç $\pm \%10$ dahilinde uyumlu olmalıdır. Eğer uyumlu değilse, numune homojen değildir. Eğer uyumlu ise ortalama özdirenç;

$$\rho_{av} = \frac{\rho_A + \rho_B}{2} [\Omega. \text{cm}] \quad [4.14]$$

ile verilmektedir.

4.1.3.2.1.2. Magnetoözdirenç Hesabı

Magnetoözdirenç hesabı sıfır manyetik alan özdirenç hesabına benzerdir.

$$\rho_A = \frac{V_{56,23}^+(+B) - V_{56,23}^-(+B) + V_{56,23}^+(-B) - V_{56,23}^-(-B)}{I_{56}^+(+B) - I_{56}^- (+B) + I_{56}^+(-B) - I_{56}^-(-B)} \frac{w t}{b} [\Omega. \text{cm}] \quad [4.15]$$

ve

$$\rho_B = \frac{V_{56,14}^+(+B) - V_{56,14}^- (+B) + V_{56,14}^+(-B) - V_{56,14}^- (-B)}{I_{56}^+(+B) - I_{56}^- (+B) + I_{56}^+(-B) - I_{56}^- (-B)} \frac{w}{b} t \quad [\Omega. \text{cm}] \quad [4.16]$$

Bu iki öz direnç $\pm \%10$ dahilinde uyumlu olmalıdır. Eğer uyumlu değilse, numune homojen değildir. Eğer uyumlu ise ortalama magnetoöz direnç;

$$\rho_{av}(B) = \frac{\rho_A(B) + \rho_B(B)}{2} \quad [\Omega. \text{cm}] \quad [4.17]$$

ile verilmektedir.

4.1.3.2.1.3. Hall Katsayısı Hesabı

Bireysel olarak Hall katsayılarının hesabı;

$$R_{HA} = 10^8 \frac{V_{56,34}^+(+B) - V_{56,34}^- (+B) + V_{56,34}^+(-B) - V_{56,34}^- (-B)}{I_{56}^+(+B) - I_{56}^- (+B) + I_{56}^+(-B) - I_{56}^- (-B)} \frac{t}{B} \quad [\text{cm}^3. \text{C}^{-1}] \quad [4.18]$$

Ve

$$R_{HB} = \frac{V_{56,21}^+(+B) - V_{56,21}^- (+B) + V_{56,21}^+(-B) - V_{56,21}^- (-B)}{I_{56}^+(+B) - I_{56}^- (+B) + I_{56}^+(-B) - I_{56}^- (-B)} \frac{t}{B} \quad [\text{cm}^3. \text{C}^{-1}] \quad [4.19]$$

ile verilmektedir. R_{HA} ve $R_{HB} \pm \%10$ dahilinde uyumlu değil ise, numune homojen değildir. Eğer uyumlu ise ortalama Hall katsayısı;

$$R_{Hav} = \frac{R_{HA} + R_{HB}}{2} \quad [\text{cm}^3. \text{C}^{-1}] \quad [4.20]$$

ile verilmektedir.

4.1.3.2.1.4. Hall Mobilitesi Hesabı

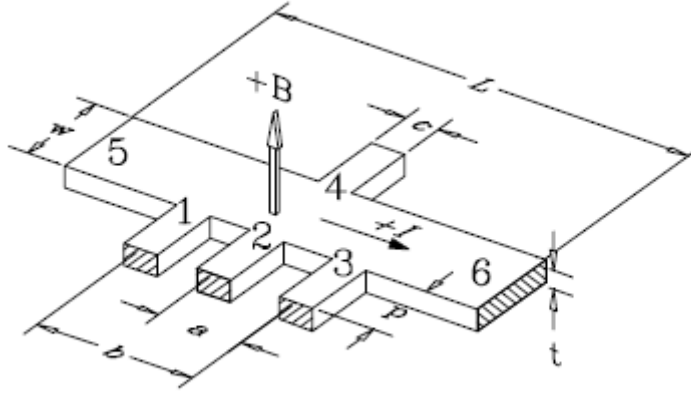
Hall mobilitesi;

$$\mu_H = \frac{|R_{Hav}|}{\rho_{av}} \quad [\text{cm}^2. \text{V}^{-1}. \text{s}^{-1}] \quad [4.21]$$

ile verilmektedir. Buradaki ρ_{av} sıfır manyetik alan öz direncidir.

4.1.3.2.2. 6 Kontaklı 1-3-1-1 Hall Çubuk

Şekil 4.6' de 6 kontaklı 1-3-1-1 Hall çubuk verilmiştir. Bu geometri her hangi bir homojenlik kontrol etmemize olanak sağlamaz. Fakat numunenin tam ortasındaki Hall voltajını ölçer.



Şekil 4.6 : İdeal 1-3-1-1 Hall çubuk gösterimi.

4.1.3.2.2.1. Özdirenç Hesabı

Sıfır manyetik alandaki özdirenci hesaplamak için;

$$\rho = \frac{V_{56,13}^+(B=0) - V_{56,13}^-(B=0)}{I_{56}^+(B=0) - I_{56}^-(B=0)} \frac{w t}{b} [\Omega. \text{cm}] \quad [4.22]$$

ile verilmektedir.

4.1.3.2.2.2. Magnetoözdirenç Hesabı

Magnetoözdirenç hesabı;

$$\rho(B) = \frac{V_{56,13}^+(+B) - V_{56,13}^-(+B) + V_{56,13}^+(-B) - V_{56,13}^-(-B)}{I_{56}^+(+B) - I_{56}^-(+B) + I_{56}^+(-B) - I_{56}^-(-B)} \frac{w t}{b} [\Omega. \text{cm}] \quad [4.23]$$

ile verilmektedir.

4.1.3.2.2.3. Hall Katsayısı Hesabı

Hall katsayısı hesabı;

$$R_H = 10^8 \frac{V_{56,24}^+(+B) - V_{56,24}^-(+B) + V_{56,24}^+(-B) - V_{56,24}^-(-B)}{I_{56}^+(+B) - I_{56}^-(+B) + I_{56}^+(-B) - I_{56}^-(-B)} \frac{t}{B} [\text{cm}^3. \text{C}^{-1}] \quad [4.24]$$

ile verilmektedir.

4.1.3.2.2.4. Hall Mobilitesi

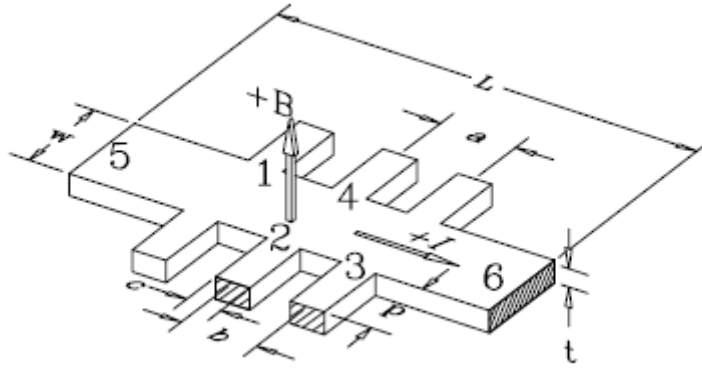
Hall mobilitesi

$$\mu_H = \frac{|R_H|}{\rho} [\text{cm}^2. \text{V}^{-1}. \text{s}^{-1}] \quad [4.25]$$

ile verilmektedir. Buradaki ρ magnetoözdirenç ya da sıfır manyetik alan özdirençtir.

4.1.3.2.3. 8-Kontaklı (1-3-3-1) Hall Çubuk

8-kontaklı (1-3-3-1) Hall çubuk geometrisi ideal olarak Hall çubuklarının en simetridir. Şekil 4.7' de 8-kontaklı (1-3-3-1) Hall çubuğu gösterilmiştir. Şekil 4.7' de görüldüğü gibi numunenin uzun eksenı boyunca karşılıklı yerleştirilmiş üç kontaklıtan oluşan iki set vardır. Akım 5 kontağından 6 kontağına doğru aktığında 1 ve 4 kontakları arasındaki voltaj ölçülür. Bu ölçüm tekniğinde sadece sekiz kontağın altısı kullanılır. Geriye kalan iki kontak (Şekil 4.7' de numaralandırılmamış kontaklar) numuneyi tamamen simetrik tutmak için barındırılır. 8-kontaklı (1-3-3-1) Hall çubuk numunenin merkezindeki Hall voltajını ölçmek için faydalıdır.



Şekil 4.7 : 8-kontaklı (1-3-3-1) Hall çubuk geometrisi.

4.1.3.2.3.1. Özdirenç Hesabı

Sıfır manyetik alan altında özdirenç hesabında aşağıdaki eşitlikler kullanılır;

$$\rho_A = \frac{V_{56,23}^+(B=0) - V_{56,23}^-(B=0)}{I_{56}^+(B=0) - I_{56}^-(B=0)} \frac{w t}{b} [\Omega. \text{cm}] \quad [4.26]$$

ve

$$\rho_B = \frac{V_{56,14}^+(B=0) - V_{56,14}^-(B=0)}{I_{56}^+(B=0) - I_{56}^-(B=0)} \frac{w t}{b} [\Omega. \text{cm}] \quad [4.27]$$

Eğer ρ_A ve ρ_B değerleri arasında $\pm \%10$ dahilinde bir uyum yoksa, o zaman numune homojen değil ya da farklı sebepler vardır. Uyumlu ise ortalama özdirenç;

$$\rho_{av} = \frac{\rho_A + \rho_B}{2} [\Omega. \text{cm}] \quad [4.28]$$

şeklindedir.

4.1.3.2.3.2. Magnetoözdirenç Hesabı

Magnetoözdirenç hesabı için;

$$\rho_A = \frac{V_{56,23}^+(+B) - V_{56,23}^-(+B) + V_{56,23}^+(-B) - V_{56,23}^-(-B)}{I_{56}^+(+B) - I_{56}^-(+B) + I_{56}^+(-B) - I_{56}^-(-B)} \frac{w}{b} t [\Omega \cdot \text{cm}] \quad [4.29]$$

ve

$$\rho_B = \frac{V_{56,14}^+(+B) - V_{56,14}^-(+B) + V_{56,14}^+(-B) - V_{56,14}^-(-B)}{I_{56}^+(+B) - I_{56}^-(+B) + I_{56}^+(-B) - I_{56}^-(-B)} \frac{w}{b} t [\Omega \cdot \text{cm}] \quad [4.30]$$

denklerini kullanılır. Bu iki değer $\pm \%10$ dahilinde uyumluluk yoksa, o zaman numune homojen değildir. Uyumlu ise, ortalama magnetoözdirenç;

$$\rho_{av}(B) = \frac{\rho_A(B) + \rho_B(B)}{2} [\Omega \cdot \text{cm}] \quad [4.31]$$

ifadesi ile verilmektedir.

4.1.3.2.3.3. Hall Katsayısı Hesabı

Hall katsayısı hesabında;

$$R_H = 10^8 \frac{t}{B} \frac{V_{56,24}^+(+B) - V_{56,24}^-(+B) + V_{56,24}^-(-B) - V_{56,24}^+(-B)}{I_{56}^+(+B) - I_{56}^-(+B) + I_{56}^-(-B) - I_{56}^+(-B)} [\text{cm}^3 \cdot \text{C}^{-1}] \quad [4.32]$$

İfadesi kullanılmaktadır.

4.1.3.2.3.4. Hall Mobilitesi Hesabı

Hall mobilitesi hesabında;

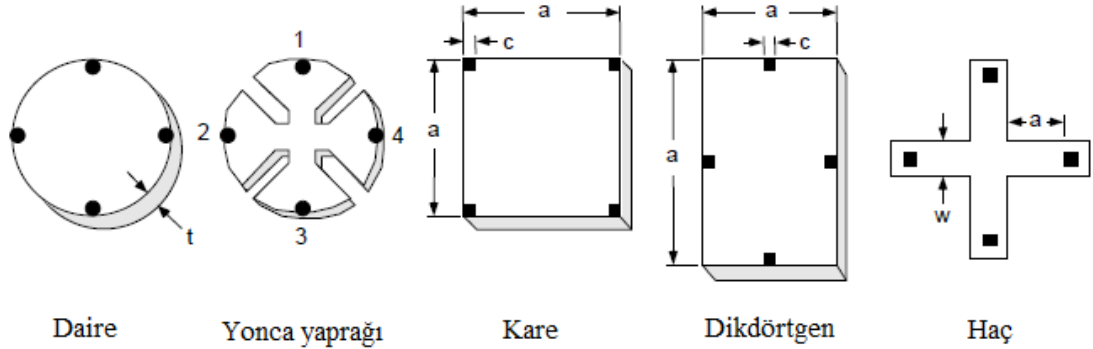
$$\mu_H = \frac{|R_{Hav}|}{\rho_{av}} [, \text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}] \quad [4.33]$$

eşitliği kullanılır. Buradaki ρ_{av} eğer ölçülebilirse magnetoözdirenç, ölçülemezse sıfır manyetik alan özdirençtir.

4.1.3.3. Van der Pauw Geometrisi

Hem mobilitiyi hem de tabaka yoğunluğunu belirlemek için, özdirenç ölçümleri ve Hall ölçümlerinin kombinasyonuna ihtiyaç vardır. Bu kısımda homojen numunelerin özdirençlerini belirlemek için yarıiletken ölçümlerinde yaygın olarak kullanılan Van der Pauw tekniğini tartışacağız (Ahmer, 2006). Hall çubuk geometrilerinin bazı dezavantajlarından kaçınmak için Van der Pauw numune geometrileri kullanılabilir. Van der Pauw numunelerin avantajları, sadece 4 kontak gereklidir, kontaklar arasındaki mesafeyi ya da numune genişliklerini ölçmeye gerek yoktur ve basit geometriler kullanılmaktadır. Dezavantajları ise, kontak boyutu ve yeri yüzünden oluşan hatalar

basit geometriler kullanıldığında önemli olabilir. Şekil 4.8’ de yaygın olarak kullanılan Van der Pauw numune geometrileri verilmiştir (Lake-Shore).



Şekil 4.8 : Yaygın olan Van der Pauw numune geometrileri. Kontaklar siyah kısımlardır.

Kare ve daire şeklindeki Van der Pauw numune geometrileri en yaygın kullanılan Van der Pauw numune geometrileridir. Kontak boyutu ve yeri önemli derecede ölçüm doğruluğunu etkileyebilir. Kenar uzunluğu a olan kare numuneler ve dört köşedeki dikdörtgen ya da kare kontakların boyutu δ için, $(\delta/a) < 0.1$ ise o zaman ölçüm hatası % 10’ dan daha azdır (R. Chwang, 1974). Köşeler yerine kare numunelerin kenar ortaylarına yerleştirilen kontaklar hatayı azaltır (Perloff, 1977).

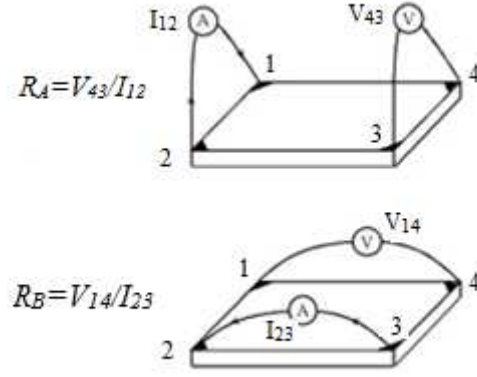
Kontak boyutu iki kontak arasından akım geçirmek için gerekli olan voltajı etkiler. İdeal nokta kontaklar, kontak boyutu yüzünden her hangi bir hata üretmez, fakat ölçülemeyecek kadar küçük kontak bölgeleri boyunca akım geçirmek için daha büyük voltaj gereklidir. Van der Pauw numune geometrileri Hall çubuktakinden kullanılan uygun uyarma voltajından daha az etkilidir. Van der Pauw geometrisinde düzgün ölçüm alabilmek için;

- Kalınlığı ihmal edilebilir numunelerin numune çevresinden alınan nokta kontaklar yeterlidir. Ancak, daha kalın numunelerde kontaklar tüm kalınlık boyunca ince dikey çizgiler şeklinde olmalıdır.
- Kontaklar oldukça küçüktür. Prensip, çok ince numunelerde kontaklar nokta gibi olmalıdır, daha kalın numunelerde ise kontaklar ihmal edilebilir bir bölgeye sahip olmalıdır.
- Numune, homojen bir kalınlığa sahiptir.

- Kontaklar numune yüzeyine her hangi bir boşluk içermeyecek şekilde bağlanmıştır (Lake-Shore) (Daghero).

şartlar sağlanmalıdır.

Özdirenç ölçümünün amacı tabaka direncini (R_s) belirlemek içindir. Van der Pauw Şekil 4.9’ de gösterilen iki karakteristik R_A ve R_B direncinin olduğunu gösterdi.



Şekil 4.9 : Van der Pauw’ un gösterdiği iki karakteristik direnç.

R_A ve R_B ’ nin tabaka yoğunluğu R_s ’ ye bağlılığı;

$$e^{\left(\frac{-\pi R_A}{R_s}\right)} + e^{\left(\frac{-\pi R_B}{R_s}\right)} = 1 \quad [4.34]$$

ile verilmektedir. Bu ifade, R_s için nümerik olarak çözülebilir.

Külçe elektrik öz direnci ρ tabaka direncini kullanarak;

$$\rho = R_s d \quad [4.35]$$

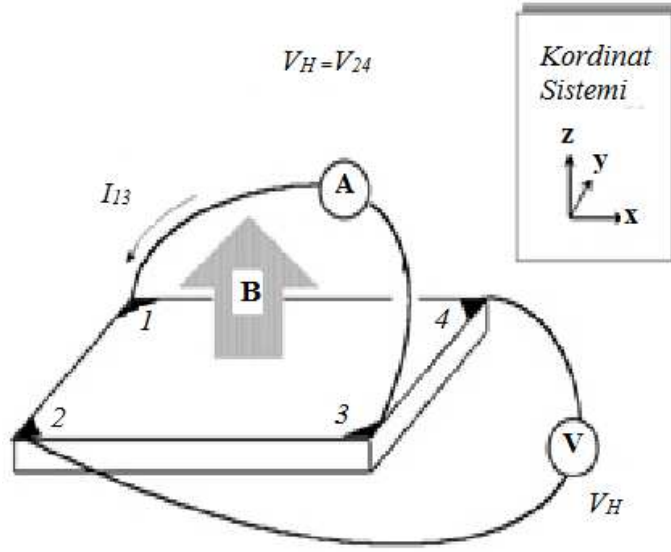
ifadesinden hesaplanabilir.

Buradaki iki karakteristik direnci elde etmek için, Şekil 4.9’ de gibi 1 ile 2 kontakları arasına bir doğru akım (DC) uygulayarak 4 ve 3 kontakları arasındaki potansiyel düşmesi ölçülür ve benzer şekilde, 2 ve 3 kontakları arasına bir doğru akım uygulayıp 1 ve 4 kontakları arasındaki potansiyel düşmesi ölçülüp aşağıdaki denklemleri kullanarak R_A ve R_B ‘ yi hesaplarız.

$$R_A = \frac{V_{43}}{I_{12}} \text{ ve } R_B = \frac{V_{14}}{I_{23}} \quad [4.36]$$

Van der Pauw tekniğindeki Hall ölçümün amacı Hall voltajı (V_H) kullanarak tabaka taşıyıcı yoğunluğu (n_s) belirlemektir. Hall voltaj ölçümü numune düzlemine sabit bir akım (I) ve numune düzlemine dik sabit bir manyetik alan (B) uygulandığında ölçülen

potansiyel düşmesidir. Şekil 4.10’ de bir numuneye uygulanan sabit bir akım ve sabit bir manyetik alanı göstermektedir.



Şekil 4.10 : Numuneye uygulanan sabit bir akım ve sabit bir manyetik alan göstermektedir.

Hall voltajını (V_H) ölçmek için, bir I akımı numunenin 1 ve 3 kontakları boyunca uygulanır ve 2 ve 4 nolu kontaklar arasındaki potansiyel düşmesi okunur. Bu potansiyel düşmesi Hall voltajıdır. Hall voltajı elde edildiğinde, tabaka taşıyıcı yoğunluğu (n_s);

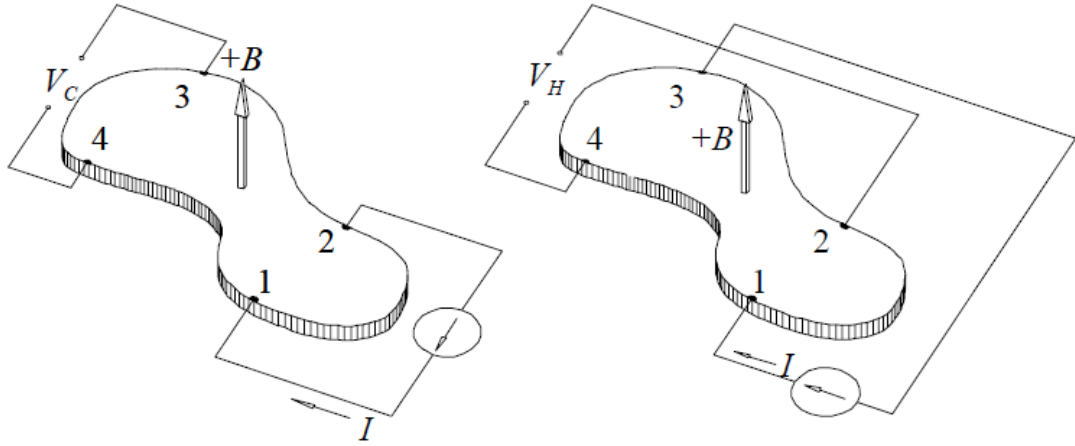
$$n_s = \frac{IB}{q|V_H|} \quad [4.37]$$

bağıntısı yardımıyla hesaplanabilir (Ahmer, 2006).

4.1.3.3.1. Van der Pauw Ölçümleri

1958’ de, Van der Pauw ince bir iletken katmandaki genel potansiyel problemini çözdü. Bu çözüm homojen kalınlıklı her hangi bir numunede Hall ve öz direnç ölçümlerinin yapılmasına olanak sağladı. Tabaka öz direncini ve taşıyıcı konsantrasyonu hesaplamak için gerekli olan şey yüzeyin kenarlarındaki dört nokta kontaklıdır.

Diğer bir yandan, Van der Pauw yapısı kontakların sonlu boyutu yüzünden kaynaklanan hatalara Hall çubuktan daha elverişlidir. Van der Pauw geometrili numunelerde doğru şekilde magnetodirenç ölçmek imkansızdır. Dolayısıyla hem magnetodirenç hem de Hall ölçümleri Hall çubuk geometrileri ile yapılmalıdır.



Şekil 4.11 : Van der Pauw geometrisi kullanarak öz direnç ve Hall katsayısının ölçümü.

Temel Van der Pauw kontak düzeninde, numuneye uygulanana dik bir manyetik alan altında numune kenarına yapılan dört kontak Şekil 4.11’ de görüldüğü gibi saatin dönme yönünde artan bir şekilde numaralandırılmıştır. Ölçümlerde kullanılan numunenin içinde her hangi bir boşluk olmamalı, numune düzgün kalınlığa sahip ve homojen olmalıdır.

4.1.3.3.1.1. Öz direnç Hesabı

$$\rho_A = \frac{\pi f_A t}{\ln(2)} \left\{ \frac{V_{12,43}^+ - V_{12,43}^- + V_{23,14}^+ - V_{23,14}^-}{I_{12}^+ - I_{12}^- + I_{23}^+ - I_{23}^-} \right\} [\Omega \cdot \text{cm}] \quad [4.38]$$

ve

$$\rho_B = \frac{\pi f_B t}{\ln(2)} \left\{ \frac{V_{34,21}^+ - V_{34,21}^- + V_{41,23}^+ - V_{41,23}^-}{I_{34}^+ - I_{34}^- + I_{41}^+ - I_{41}^-} \right\} [\Omega \cdot \text{cm}] \quad [4.39]$$

Buradaki geometrik faktör olan f_A ve f_B sırasıyla direnç oranlarının fonksiyonu Q_A ve Q_B ’ dir. Q_A ve Q_B ;

$$Q_A = \left(\frac{R_{12,43}^+ - R_{12,43}^-}{R_{23,14}^+ - R_{23,14}^-} \right) = \left(\frac{V_{12,43}^+ - V_{12,43}^-}{I_{12}^+ - I_{12}^-} \right) \left(\frac{I_{23}^+ - I_{23}^-}{V_{23,14}^+ - V_{23,14}^-} \right) \quad [4.40]$$

ve

$$Q_B = \left(\frac{R_{34,21}^+ - R_{34,21}^-}{R_{41,23}^+ - R_{41,23}^-} \right) = \left(\frac{V_{34,21}^+ - V_{34,21}^-}{I_{34}^+ - I_{34}^-} \right) \left(\frac{I_{41}^+ - I_{41}^-}{V_{41,23}^+ - V_{41,23}^-} \right) \quad [4.41]$$

ifadeleri ile verilmektedir.

Hem Q_A hem de Q_B ikisi de 1’den büyükse, bu durumda f ve Q arasındaki ilişki nümerik olarak çözülebilen transandantal eşitlik yardımıyla ifade edilmektedir;

$$\frac{Q-1}{Q+1} = \frac{f}{\ln 2} \cosh^{-1} \left\{ \frac{1}{2} \exp \left[\frac{\ln 2}{f} \right] \right\} \quad [4.42]$$

İki öz direnç ρ_A ve $\rho_B \pm \%10$ dahilinde birbirleriyle uyumlu olmalıdır. Eğer değilse, o zaman numune homojen değildir ya da farklı sebepler vardır. Eğer uyumlu ise, ortalama direnç,

$$\rho_{av} = \frac{\rho_A + \rho_B}{2} \quad [\Omega. \text{cm}] \quad [4.43]$$

olarak verilir.

4.1.3.3.1.2. Magnetoözdirenç Hesabı

Magnetoözdirenç manyetik alanın varlığında hesaplanır. Bu durumda öz dirençleri yazacak olursak;

$$\rho_A(B) = \frac{\pi f_A t}{\ln(2)} \left\{ \frac{V_{12,43}^+(+B) - V_{12,43}^- (+B) + V_{23,14}^+(+B) - V_{23,14}^- (+B)}{I_{12}^+(+B) - I_{12}^- (+B) + I_{23}^+(+B) - I_{23}^- (+B)} \dots \right. \\ \left. \dots \frac{V_{12,43}^+(-B) - V_{12,43}^- (-B) + V_{23,14}^+(-B) - V_{23,14}^- (-B)}{+I_{12}^+(-B) - I_{12}^- (-B) + I_{23}^+(-B) - I_{23}^- (-B)} \right\} [\Omega. \text{cm}] \quad [4.44]$$

ve

$$\rho_B(B) = \frac{\pi f_B t}{\ln(2)} \left\{ \frac{V_{34,21}^+(+B) - V_{34,21}^- (+B) + V_{41,23}^+(+B) - V_{41,23}^- (+B)}{I_{34}^+(+B) - I_{34}^- (+B) + I_{41}^+(+B) - I_{41}^- (+B)} \dots \right. \\ \left. \dots \frac{V_{34,21}^+(-B) - V_{34,21}^- (-B) + V_{41,23}^+(-B) - V_{41,23}^- (-B)}{+I_{34}^+(-B) - I_{34}^- (-B) + I_{41}^+(-B) - I_{41}^- (-B)} \right\} [\Omega. \text{cm}] \quad [4.45]$$

Buradaki f_A ve f_B faktörleri sıfır manyetik alan altındaki hesap şekli ile hesaplanır. Ortalama manyetoözdirenç;

$$\rho_{av}(B) = \frac{\rho_A(B) + \rho_B(B)}{2} \quad [\Omega. \text{cm}] \quad [4.46]$$

Bu ölçüm materyalin iletkenlik tensörü açısından tanımlandığı için doğru manyetoözdirenç vermez. Manyetik alan numune içinde akım yoğunluğu vektör alanı değiştirdiği için Van der Pauw'un öz direnç hesabı manyetik alanın varlığında geçersizdir.

4.1.3.3.1.3. Hall Katsayısı Hesabı

Hall katsayısının iki değerini aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplarız;

$$R_{HC} = 10^8 \frac{t}{B} \frac{V_{31,42}^+(+B) - V_{31,42}^-(+B) + V_{31,42}^-(-B) - V_{31,42}^+(-B)}{I_{31}^+(+B) - I_{31}^- (+B) + I_{31}^-(-B) - I_{31}^+(-B)} [\text{cm}^3 \cdot \text{C}^{-1}] \quad [4.47]$$

ve

$$R_{HD} = 10^8 \frac{t}{B} \frac{V_{42,13}^+(+B) - V_{42,13}^- (+B) + V_{42,13}^-(-B) - V_{42,13}^+(-B)}{I_{42}^+(+B) - I_{42}^- (+B) + I_{42}^-(-B) - I_{42}^+(-B)} [\text{cm}^3 \cdot \text{C}^{-1}] \quad [4.48]$$

R_{HC} ve $R_{HD} \pm \% 10$ dahilinde uyumlu olmalıdır. Eğer değilse, numune homojen değildir. Uyumlu ise, o zaman ortalama Hall katsayısı;

$$R_{Hav} = \frac{R_{HC} + R_{HD}}{2} [\text{cm}^3 \cdot \text{C}^{-1}] \quad [4.49]$$

ifadesinden hesaplanır.

4.1.3.3.1.4. Hall Mobilitesi Hesabı

Hall mobilitesi;

$$\mu_H = \frac{|R_{Hav}|}{\rho_{av}} [\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}] \quad [4.50]$$

ifadesinden hesaplanır. Buradaki ρ_{av} eğer ölçülebilirse magnetoözdirenç, ölçülemezse sıfır manyetik alan özdirençtir.

5. BÖLÜM

5.1. HALL OLAYI ÖLÇÜM SİSTEMİ (HEMS)



Şekil 5.1 : Sivas Cumhuriyet Üniversitesinde bulunan HEMS sistemi.

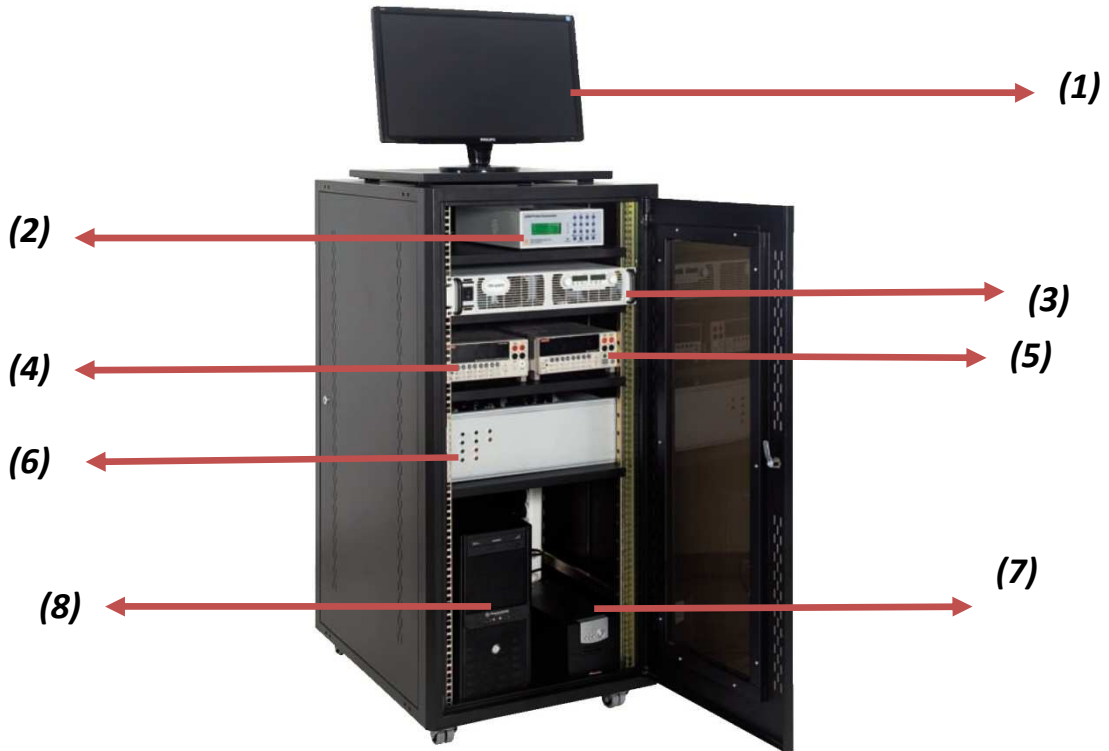
Bu tez kapsamında Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Nanoteknoloji merkezinde bulunan Hall olayı ölçüm sistemi (Hall Effect Measurement System: HEMS) vasıtasıyla safır alttaş üzerine büyütülen GaN/GaAlN heteroyapılarının elektriksel karakterizasyonu incelendi. HEMS materyallerin elektronik özelliklerini analiz etmek ve ölçmek için dizayn edilmiş birleşik donanım ve yazılım sistemidir. HEMS kullanımı kolay ve hassas işlemler için dizayn edilmiştir. Kullanıcıya hem akımı hem de manyetik alanı kontrol imkanı verir. HEMS oda sıcaklığında her hangi bir donanım değiştirmeksizin 2 numuneyi ölçer. Hall olayı ölçümleri yarıiletken ve çok katmanlı cihazların geniş bir kısmını, yüksek oranda katkılı yarıiletkenlerin özelliklerini karakterizasyonuna ek olarak yüksek iletkenliğe sahip organik ve düşük numune dirençli inorganik materyallerin özelliklerinin karakterizasyonuna da uygundur. Bu materyaller GaAs, InP, InAs, Si, Ge, SiGe, HgCdTe, GaN, SiC, AlN, metal oksitler ve organik iletkenleri içerir. Hall olayı ölçümleri ve manyetodirenç ideal olarak materyal araştırma, ürün gelişimi ve ürün kalite kontrol için uygundur.

Hall olayı ölçüm yazılımı Windows®-7 ile çalışır. Hall yazılımı numune direncini, öz direnci, Hall katsayısını, Hall mobilitesi, taşıyıcı konsantrasyonunu ya da akım-voltaj karakteristiklerini belirlemek için dizayn edilmiştir. Yazılım 4-kontaklı Van der Pauw ve 6-kontaklı Hall bar geometrili çoklu numunelerdeki dataları otomatik olarak kayıt eder.

Numune kartı içerisine yerleştirilen numune tutucu modülüne numuneleri takarak hızlı bir biçimde ölçümler alınır. Tüm kontaklardaki I-V eğrilerini ölçmek için tek bir profil tanımlanmıştır bu sayede çoklu ölçümleri tek bir seferde yapılmaktadır. Hall voltajı, direnç, magnetodirenç ve akım-voltaj karakteristiklerini ölçer ve bunlardan yararlanarak öz direnç, Hall katsayısı, taşıyıcı konsantrasyonu ve taşıyıcı mobilitesini hesaplar.

5.2. HEMS DONANIMLARI

5.2.1. Kontrol Ünitesi



Şekil 5.2: HEMS Kontrol Ünitesi.

HEMS sisteminin kontrol birimindeki malzemeler;

- 1) Gösterge Birimi: Standart LCD monitör
- 2) Gaussmetre: Kullanılan mıknatıslardaki manyetik alanı ölçer.

3) Lambda Güç Kaynağı: 3.3 kW güç kaynağı, Maksimum akım 80 A ve maksimum voltaj 40 V DC.

4) Keithly 2700 Multimetre ve Keithly 7709 matris modülü: Keithly 2700 6¹/₂ haneli yüksek performanslı multimetre ya da data alım sistemidir. Keithly 7709 modülü 6x8 matris (6 sütun, 8 kolon) olarak ayarlanmıştır. Matris modül 48 çapraz nokta kanaldan ve 2 arka plan yalıtım kanalından oluşur.

5) Keithly 2400 Akım kaynağı: Kaynak limitleri ± 50 nA ile ± 1 A kadardır.

6) Değiştirme (Anahtar) kutusu: Değiştirme kutusu sıcaklığı, mıknatısın kutupluluğunu ve numune tutucudaki bağlantıları kontrol eder.

7) UPS: Kesintisiz güç kaynağı.

8) Bilgisayar.

5.2.2. Mıknatıs



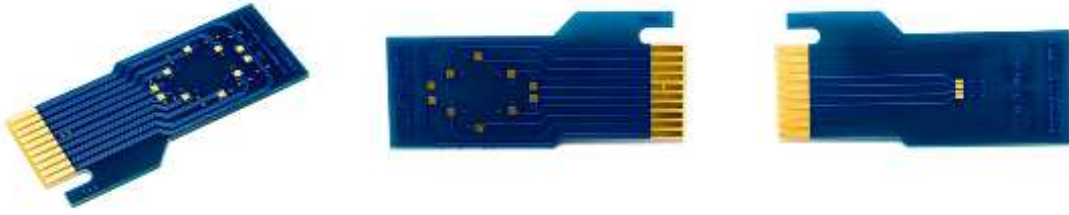
Şekil 5.3 : HEMS sisteminde kullanılan Mıknatıs.

HEMS sisteminde kullanılan mıknatısların özelliklerini bir çizelge üzerinde gösterecek olursak;

Çizelge 5.1: HEMS Sisteminde kullanılan mıknatısların özellikleri.

Mıknatıs Kutuplarının yüzey çapı	4-inch(10.2cm)
Maksimum Manyetik alan akış yoğunluğu	2.0 T (Tesla)
Soğuk su desteği	Kapalı soğuk sistem hattı
Giriş Sıcaklığı	Maksimum 50 °C

5.2.3. Numune Tutucu



Şekil 5.4: İki taraflı numune tutucular

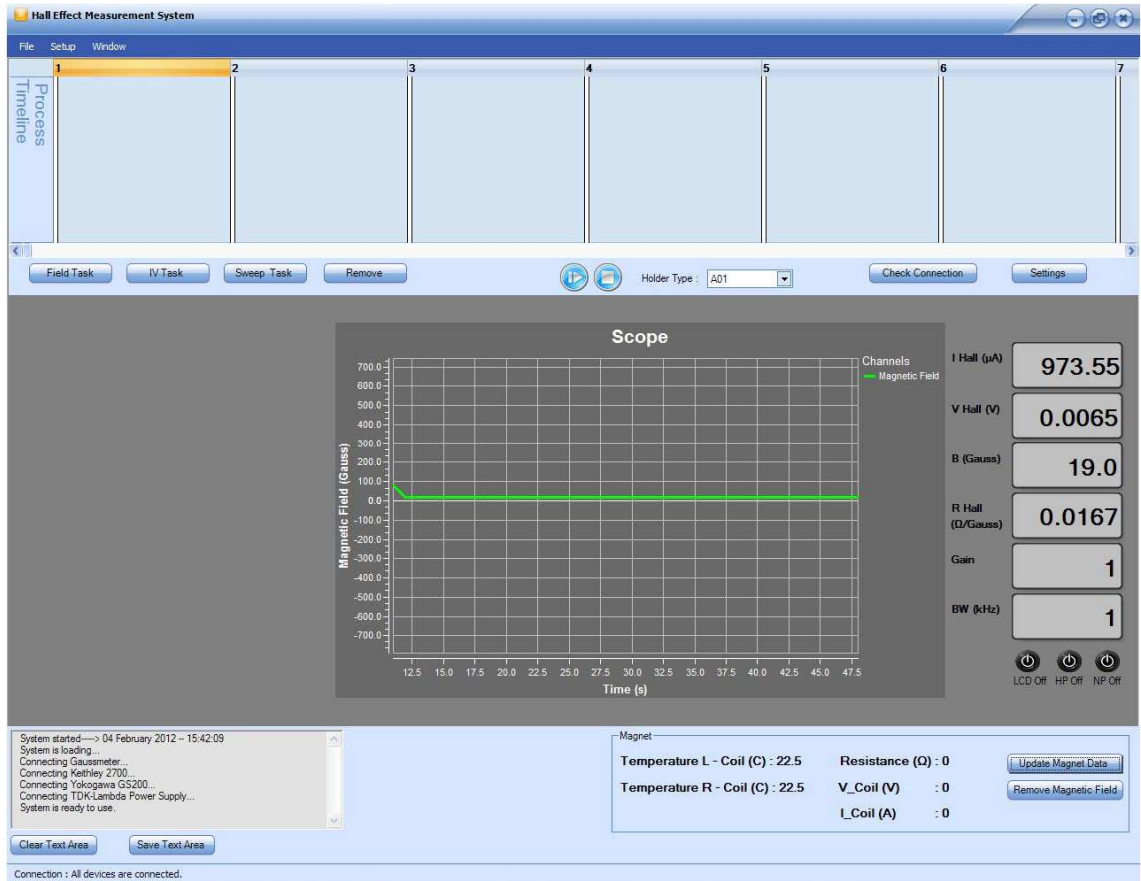
Üç tip numune tutucu modülü vardır. Her bir tipin iki tarafından ölçüm almak için bağlantı modülü vardır. Numuneden 4 ile 10 kantağa kadar kontak alma imkanı sağlar. Yalnız sistem 4 kontaklı Van der Pauw ve 6 kontaklı Hall bar geometrilerini destekler.

5.2.4. Yazılım

5.2.4.1. Genel Bakış

Hall olayı ölçüm yazılımı ölçüm esnasında sistem aletlerini kontrol etmek ve numune direncini, öz direnci, Hall katsayısını, Hall mobilitesini, taşıyıcı konsantrasyonu ve akım-voltaj karakterizasyonu belirlemek için dizayn edilmiştir. Yazılım ölçüm sonuçlarını otomatik olarak kayıt ediyor ve kayıt edilen datalar ilerleyen proseslerde analiz için kullanabilir.

5.2.4.2. Program Açıklama



Şekil 5.5 : HEMS yazılımının ana görünümü.

HEMS sisteminin yazılımın ana görünümünün içinde barındırdığı komutları ve bu komutların görevlerini Çizelge 5.2 üzerinde incelersek;

Çizelge 5.2: HEMS sistemin yazılımın ana görünümdeki komutlar ve bunların görevleri.

Process Timeline	Process Timeline ölçme görevlerini içerir. Kullanıcı dikdörtgen kutularda seçilen ölçüm seçeneklerini görebilir. Process timeline üzerindeki sarı çizgi o anki yapılan işlemi göstermektedir.
Field Task	İstenilen manyetik alan değerine ayarlamazı sağlar.
IV Task	I-V karakteristiğini ölçer.
Sweep Task	Değişen manyetik alan altında, elektriksel ölçüm yapar.
Remove	Process timeline daki seçilen görevleri siler.

 → Start Measurement	Process timeline daki görevleri başlatır.
 → Stop Measurement	Ölçüm esnasında ölçümü sonlandırıp sistemi başlangıç koşullarına ayarlar.
Holder Type	Ölçümler için numune tutucu tipini seçer.
Check Connection	Numune kontaklarının direncini okur.
Settings	Sistem konfigürasyonunu ayarlar.
Temperature L-Coil	Celsius cinsinden sol mıknatıs bobininin sıcaklığını gösterir. Eğer bobin sıcaklığı limit değeri aşarsa gösterge rengi kırmızıya döner.
Temperature R-Coil	Celsius cinsinden sağ mıknatıs bobininin sıcaklığını gösterir. Eğer bobin sıcaklığı limit değeri aşarsa gösterge rengi kırmızıya döner.
Resistance	Ohm olarak mıknatısın direncini gösterir.
V_Coil	Volt olarak mıknatıstaki voltajı gösterir.
I_Coil	Amper olarak mıknatıstaki akımını gösterir.
Update magnet data	Elle sıcaklık ve direnç değerlerini günceller.
Remove Magnetic Field	Manyetik alanı 0' a ayarlar.
Text Area	Text dosyası olarak o anki işlemi ve dataları kayıt eder.
Field Control Area	Gaussmetre parametrelerini gösterir ve ayarlar.

Ayarlar (settings) kısmını inceleyecek olursak;

Şekil 5.6: Ayarlar kısmı.

Ayarlar kısmı 3 ana sekme vardır. Bu sekmeler sayesinde sistem değişkenlerini değiştirebiliriz. Ayarlar kısmındaki genel sekmeyle ait bilgiler Çizelge 5.3’ de verilmiştir.

Çizelge 5.3: Ayarlar kısmında bulunan sekmelerden genel sekmesinin maddeleri ve görevleri.

I-V Output Path	I-V ölçümlerinin kayıt yeri.
Sweep Output Path	Sweep ölçümlerinin kayıt yeri.
Graph Output Path	Grafiğin kayıt yeri.
Current Wait	Daha doğru sonuçları görmek için ölçüm sırasında, KE2400 akım kaynağının numuneye uygulayacağı akımın süresini belirler.
Temperature Over Limit	Eğer sağ ve sol bobin sıcaklığı limit değeri aşarsa, güç kaynağı ve akım kaynağı kesilir.
Distance	Sağ ve sol bobin arasındaki mesafedir.

Ayarlar kısmındaki diğer bir sekme cihaz konfigürasyonu sekmesidir. Bu sekmenin görevi HEMS sisteminde kullanılan donanımlara özgü bilgiler verir.

SettingsForm

General | **Device Configuration** | Size Settings

Yokogawa GS200 Sourcemeter

Device ID : 8 Compliance Limit : 5

Keithley 2700 Multimeter

Device ID : 16 Reading Rate : MEDIUM

Filter Type : NONE Measurement Range : 100

Filter Window : 1 ☐ Line Synchronization

Filter Count : 1 Manual Average : 1

TDK-Lambda Power Supply

Device ID : 6 OVP (V) : 40 UVL (V) : 0

OK Cancel

Şekil 5.7: Ayarlar sekmesindeki cihaz konfigürasyonu sekmesi.

Ayarlar kısmının son sekmesi de kullanılan numunenin boyutlarını belirleyen sekmedir. Bu sekmenin görünüşü Şekil 5.8’ de verilmiştir.

SettingsForm

General Device Configuration Size Settings

Hall Bar (1-2-2-1)

T : 500 nm

A : 8 mm

W : 2 mm

Van der Pauw

Thickness : 500 nm

OK Cancel

Şekil 5.8 : Ayarlar kısmındaki boyut ayarları sekmesi.

Bu sekmede dikkat edildiği gibi iki tip numune geometrisi vardır. HEMS sistemi 4 bacaklı Van der Pauw ve 6 bacaklı Hall bar geometrilerini destekler. Burada;

T: Numunenin kalınlığı,

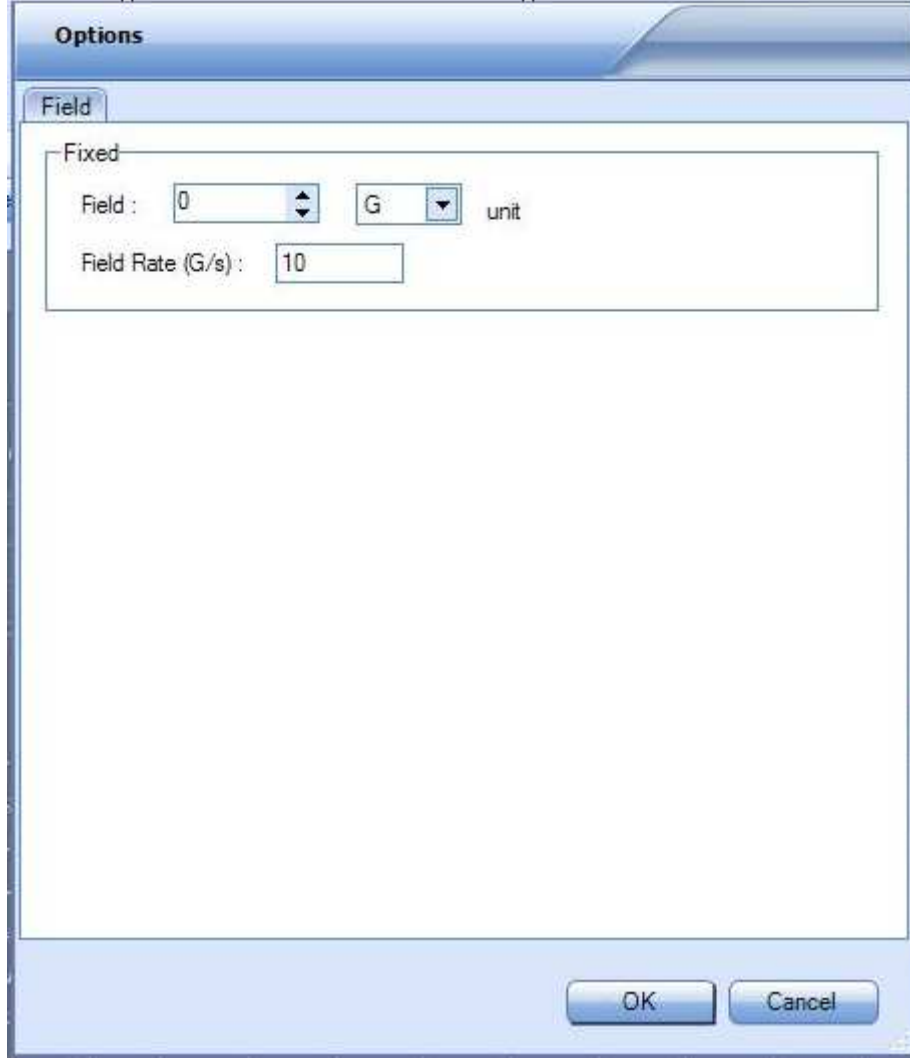
A: Numunenin kontakları arasındaki mesafe,

W: Genişlik

ile verilmektedir.

4 bacaklı Van der Pauw geometrilerinde numunenin kontakları arasındaki mesafe ile genişliği genelde aynı olduğu için Van der Pauw ölçümleri için sadece numunenin kalınlığının bilinmesi yeterlidir.

HEMS yazılımın içinde barınan diğer bir özellik Field Task' dir.



Şekil 5.9 : Field Task'ın seçenekleri.

Bu kısımda istenilen manyetik alana ayarlama yapabiliyoruz. Bu ayarlama yaparken saniyede kaç Gaussluk artışlar olması da tamamen kullanıcı kontrolündedir.

Ana görünümündeki bir diğer özellik I-V görevidir. Bu sekme sayesinde istenilen bacaklardan I-V karakteristiği ölçümleri yapılmasına olanak sağlar.

Şekil 5.10 : I-V görevinin seçenekleri.

I-V karakteristiğindeki seçeneklerin ve bunların görevleri Çizelge 5.4’ de verilmiştir.

Çizelge 5.4: I-V karakteristiğindeki seçenekler ve görevleri.

Pins (left side)	Ölçüm için uygun bacaklar
Pins (right side)	Ölçüm için seçilen bacaklar
Add	Sol taraftaki bacakları sağ taraftaki bacaklara ekler.
Remove	Sağ taraftaki seçilen bacakları kaldırır.
Remove All	Sağ taraftaki tüm bacakları kaldırır.
Front and Back side	Ölçümü yapılacak numunenin numune tutucunun neresinde olduğunu belirtir.
Start Value	Numuneye uygulanacak akımın başlangıç değeri.
End Value	Numuneye uygulanacak akımın son değeri.
Step Value	Ölçüm boyunca akımdaki artış adımları.
Number of Points	Ölçüm boyunca akımdan alacağı dataların sayısı.

Ana görünümdeki bir diğer seçenek Sweep Task’ tir.

Sweep Task' ın görünümü Şekil 5.11' de verilmiştir ve bu görünümdeki seçenekler ve bu seçeneklerin işlevleri Çizelge 5.5' de verilmiştir.

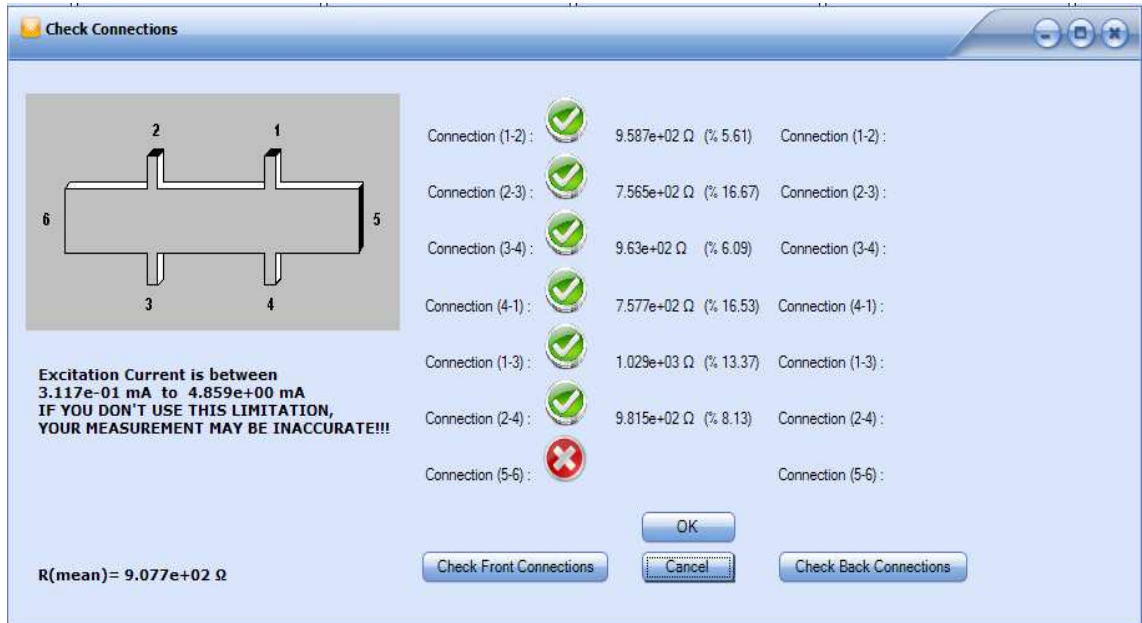
Şekil 5.11: Sweep Task' ın görünümü.

Çizelge 5.5: Sweep Task' deki seçenekler ve bu seçeneklerin işlevleri.

Measurement Type	Ölçüm yapılacak numune geometrisi (Van der Pauw ve Hall bar geometrisi)
Holder Side	Ölçüm yapılacak numunenin numune tutucudaki yeri.(Ön ya da arka taraf)
Current	Ölçüm boyunca numuneye uygulanacak akım.
Field Rate	Manyetik alanın gauss cinsinden saniyedeki artış miktarı.
Start	Ölçümün başlayacağı manyetik alan değeri.
Stop	Ölçümün biteceği manyetik alan değeri.

Step	Ölçüm boyunca manyetik alandaki artma miktarı.
Linear Sweep	Hesaplamalarda kullanmak üzere sadece pozitif manyetik alan değerlerindeki voltaj değerlerini okur.
Linear with Field Reversal	Hesaplamalarda kullanmak üzere hem pozitif manyetik alan değerlerindeki voltaj değerlerini hem de negatif manyetik alan değerindeki voltaj değerlerini okur.
Set field to zero after measurements	Ölçümden sonra, manyetik alanı sıfıra ayarlar.
Use Zero field resistivity for Hall Mobility	Sıfır manyetik alandaki magnetodirenci kullanarak Hall mobilitesini hesaplar.
Excitation current	Numuneye uygulanabilecek akım aralığını gösterir.

Ana görünümdeki diğer bir seçenekte “*Check Connections*” tır. Şekil 5.12’ da “*Check Connection*” ın görünümü verilmiştir.



Şekil 5.12: *Check Connection*’ ın görünümü.

Bu özellik sayesinde kontakların dirençlerini okunur ve okunan bu direnç değerlerini bize gösterir. Bacaklardan okunan direnç değerleri arasındaki yüzdelik farkı da gösterir. Direnç ölçümünden sonra program uyarma akımını (excitation current) hesaplar. Bu akım değeri doğru ölçümler için oldukça önemlidir. Eğer yüksek bir akım değeri numuneye uygulanırsa, numune ısınacaktır ve yüklü taşıyıcı konsantrasyonu değişecektir. Eğer düşük akım değeri numuneye uygulanırsa, yüklü taşıyıcılar uyarılmayacaktır. İdeal güç harcanımı 5 mW geçmemelidir. Minimum uyarılma akımı,

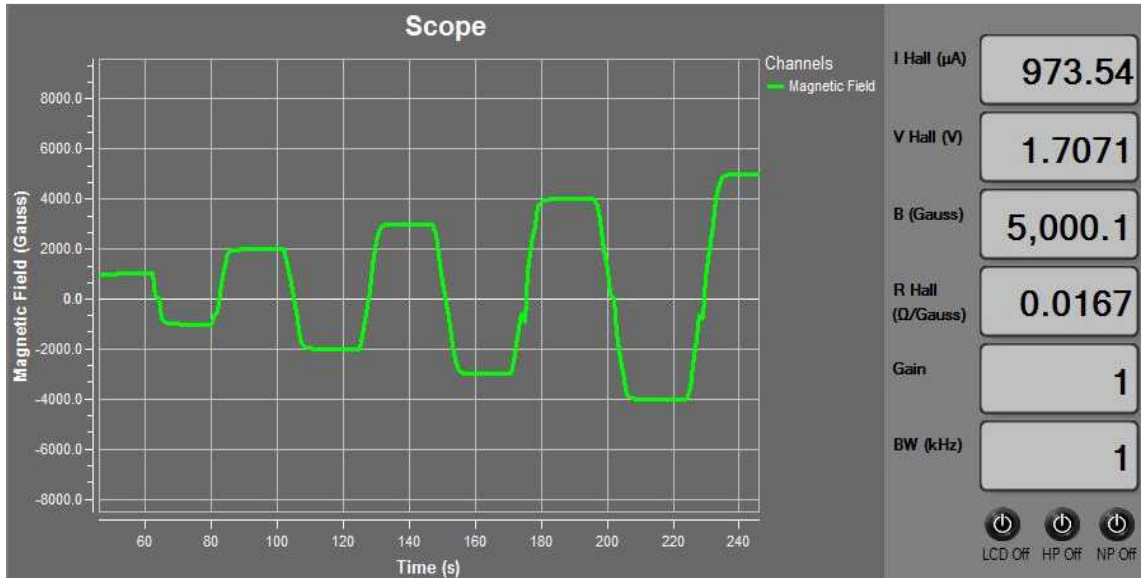
$$I_{\min} = (200R_{\max})^{-0.5} \quad [5.1]$$

ile hesaplanmaktadır. Burada $R_{\max}$ kontaklar arasındaki maksimum direnç değeridir. Maksimum uyarılama akımı;

$$I_{\max} = \frac{V_{cl}}{R_{\max}} \quad [5.2]$$

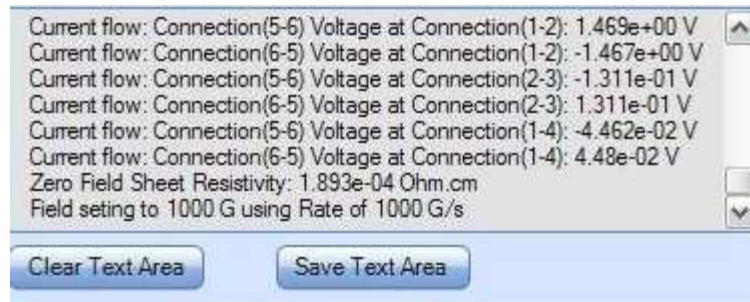
ile hesaplanmaktadır. Burada V_{cl} “compliance limit” tir. Bununla daha detaylı bilgiyi cihaz konfigürasyonunda ki ayarlar kısmında görebilirsiniz. Bu sayede numuneye uygulanacak akımın alt ve üst limitini bulmuş oluruz. Uygulanacak akım değerlerini değiştirerek ideal akım değeri bulunabilir. Eğer kullanıcı bu akım değerlerinin dışında numuneye akım uygularsa ölçüm doğru olmayabilir.

Manyetik alan kontrol bölgesi sayesinde de manyetik alanın zamanla değişimini izlenir. Şekil 5.13’ de manyetik alan kontrol bölgesinin görünümü verilmiştir.



Şekil 5.13 : Manyetik alan kontrol bölgesi.

Ana görünümdeki “text area” ile ölçümler kayıt edilir. Şekil 5.14’ de “text area” görünümü verilmiştir.



Şekil 5.14 : Text Area görünümü.

6. BÖLÜM

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Nanoteknoloji Laboratuvarındaki MOCVD sistemi ile büyütülen CN035, CN036, CN037, CN038, CN042 ve CN043 nolu numunelerin elektriksel karakterizasyonu HEMS sistemi yardımıyla incelendi. Bu tez kapsamında çalışılan numunelerin tümü (0001) yönelimine sahip safir alttaş üzerine büyütülmüş olup, bunlardan CN035, CN036 ve CN037 nolu numuneler n-tipi GaN, CN038, CN042 ve CN043 nolu numuneler ise p-tipi GaN özelliği göstermektedir. n-tipi GaN üretmek için SiH_4 (Silane), p-tipi GaN üretmek için Cp_2Mg (Biscyclopentadienylmagnesium) kullanıldı. CN035, CN036, CN037, CN038 ve CN043 nolu numunelerde safir alttaş ile GaN arasında ara tabaka olarak GaN var iken, CN042 nolu numune de ara tabaka olarak AlN kullanıldı. n-tipi GaN olan CN035, CN036 ve CN037 nolu numunelerde SiH_4 (silane) akışları sırasıyla 5,0/8,4/6,0 sccm (standard cubic centimeters per minute)' dir. CN038 ve CN043 nolu numunelerde ise Cp_2Mg akış oranı sırasıyla 125/90 sccm' dir. CN042 nolu numunede ise Cp_2Mg akış oranı 200 sccm' dir. Bu numunelerde yapılan elektriksel karakterizasyonda Van der Pauw geometrisi kullanıldı. Ölçümler sırasında ölçüm biçimi olarak “*linear field reversal*” özelliği kullanıldı. Her bir numune için değişen manyetik alan altında ölçüm alındı. Bu ölçümlerde değişen manyetik alanın Hall katsayısı, tabaka taşıyıcı yoğunluğu, Hall mobilitesi, külçe taşıyıcı yoğunluğu ve öz direnç değerleri belirlendi.

Öncelikle safir üzerine katkısız GaN ve AlN büyütme çalışmalarına ait büyütme parametreleri ve optimizasyonu verilecek daha sonra ise p ve n tipi katkılarlarına ait detaylar verilecektir.

6.1. Katkısız GaN çalışması

İlk yapılan çalışmada sistemi tanımak ve gerekli literatür sonuçlarını uygulayarak yapılan 15 civarında deneme büyütmelerinden sonra parametrik çalışma büyütmeleri yapılmıştır. Buradaki ilk aşama safir üzerine büyütülen yaklaşık 7-9 nm kalınlıklı çekirdek tabakası büyütme çalışmasıdır. Çizelge 6-1' de bu çalışmaların yapıldığı numuneler ve kullanılan parametreler verilmiştir. En önemli parametreler büyütme süresi, V/III oranı ve yeniden kristallenme (recrystallization) süresi olarak gözlenmiştir. Insitu yansıma ölçümlerinden nitel olarak yapılan değerlendirmelerin yanı sıra bu tabaka üzerine büyütülen tampon tabakasının yansıma eğrisi bize yol gösterici olmuş ve büyütülen numuneler üzerine yapılan xrd sallantı taramalarından elde edilen yarı maksimumda tam genişlik ölçümleri olarak numunelerin kristal yapısı hakkında bilgi

edindik. Dolayısı ile bu parametrelere ek olarak aynı numune numaraları için 1 μm kalın tampon tabaka büyütme parametreleri de Çizelge 6-2’ de verilmiştir.

Çizelge 6.1: Katkısız GaN çekirdeklenme (nucleation) çalışması.

Numune No	Çekirdeklenme Süresi min	Çekirdeklenme Sıcaklığı C	Altaş Dönme Akışı (ccm)	V/III Oranı	Yeniden kristallenme süresi min	Yeniden kristallenme sıcaklığı C
CN001	4,0	545	25	267	3	1030
CN002	6,5	525	25	250	4	1030
CN003	5,0	525	25	250	8	1030
CN004	5,0	525	25	250	8	1030
CN005	4,5	525	25	188	3	1020
CN006	3,0	525	25	188	5	1030
CN007	6,5	550	25	400	5	1030
CN008	5,0	550	25	200	3	1030
CN010	4,5	500	25	200	3	1000
CN011	5,8	480	25	250	3	960
CN015	3,8	500	25	200	3	900
CN016	5,0	480	25	200	3	865
CN017_2	12,0	500	25	267	3	870
CN017	4,5	500	25	200	3	870
CN018	3,0	445	25	200	3	840

CN019	8,5	445	25	200	3	840
CN020	6,0	480	25	150	3	865
CN021	4,2	480	25	150	3	865
CN022	4,2	480	25	150	3	865
CN023	8,3	480	25	150	3	865
CN024	6,5	480	25	400	5	870
CN025	4,2	480	25	150	3	865
CN026	4,2	480	25	150	3	865
CN027	4,2	480	25	150	3	865
CN028	4,2	480	25	100	3	865
CN029	3,3	480	25	80	3	865
CN029_2	2,3	480	25	70	3	865
CN030	4,2	480	25	150	3	865

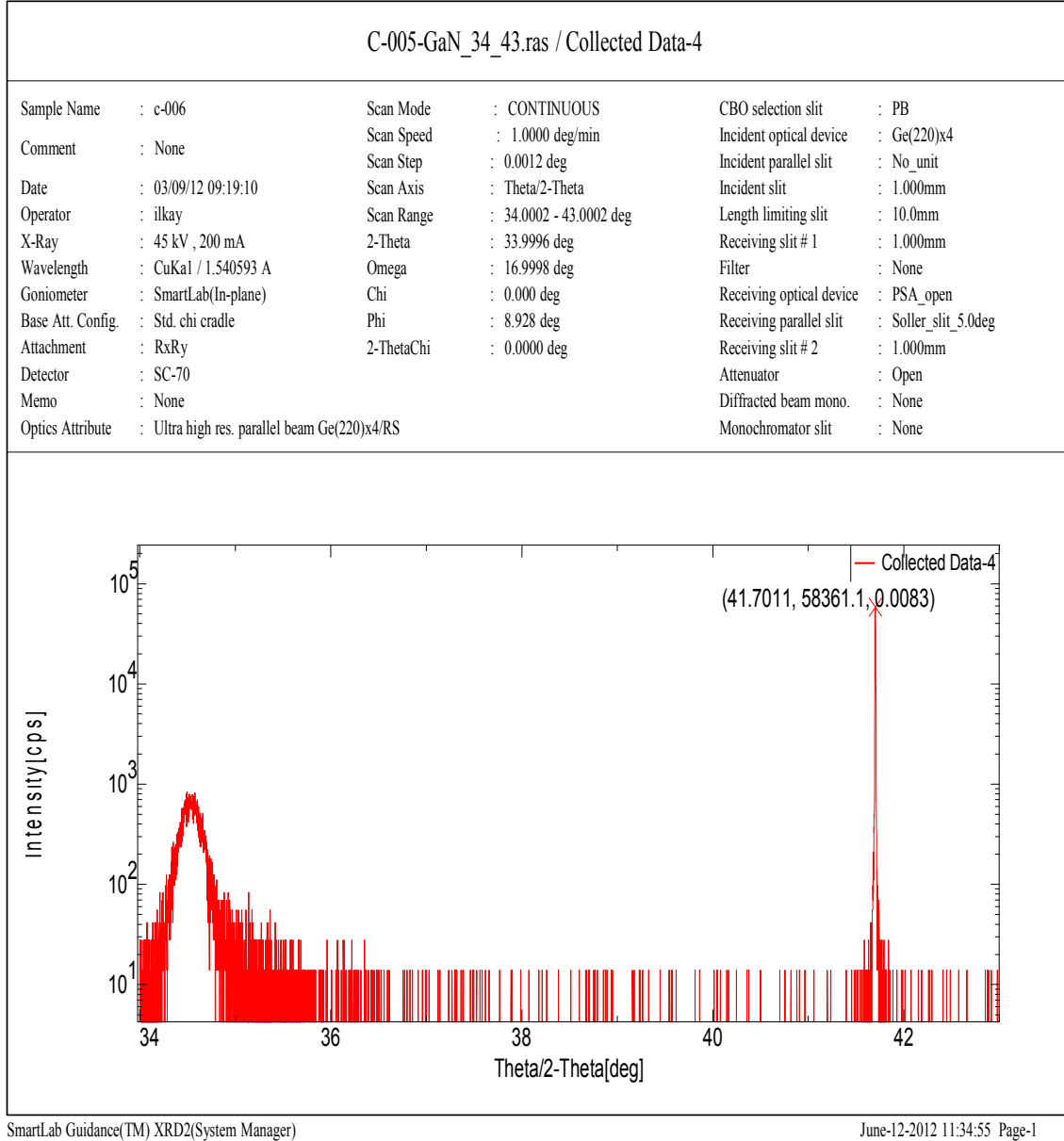
Çizelge 6.2: Katkısız GaN tampon tabakası büyütme parametreleri.

Numune No	Tampon T. büyütme süresi min	Büyütme sıcaklığı C	V/III Oranı	Altaş Dönme Akışı (ccm)
CN001	37,5	1070	90,0	30
CN002	47,5	1030	100,0	30
CN003	50,0	1045	100,0	30

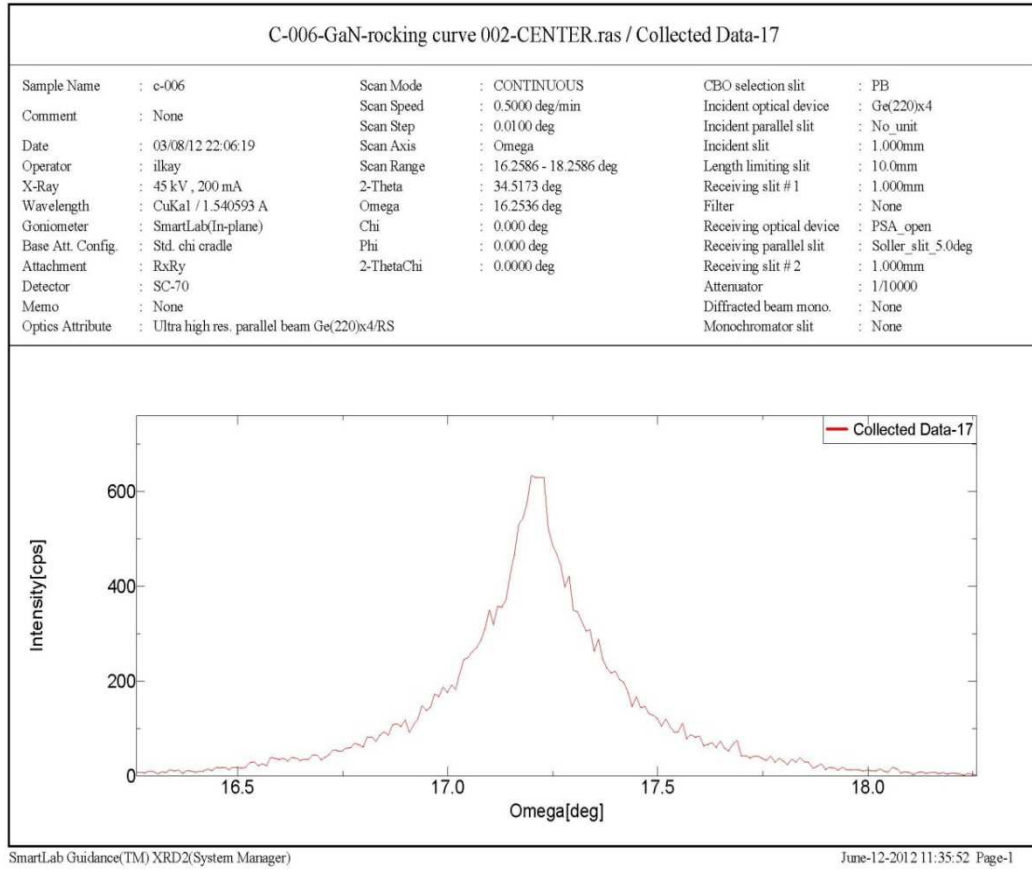
CN004	50,0	1045	100,0	60
CN005	45,0	1020	103,8	30
CN006	45,0	1030	103,8	30
CN007	45,0	1040	153,8	30
CN008	42,5	1045	153,8	30
CN010	42,5	990	153,8	30
CN011	42,5	960	200,0	30
CN015	72,5	880	153,8	30
CN016	75,0	865	153,8	30
CN017_2	37,5	870	90,0	30
CN017	75,0	870	153,8	50
CN018	75,0	840	153,8	30
CN019	75,0	840	153,8	20
CN020	75,0	865	153,8	30
CN021	72,5	865	153,8	30
CN022	52,5	865	153,8	30
CN023	52,5	865	153,8	30
CN024	45,0	870	153,8	30
CN025	46,5	865	153,8	30
CN026	46,5	865	153,8	30
CN027	46,5	865	153,8	30
CN028	46,5	865	153,8	30
CN029	46,5	865	153,8	30
CN029_2	46,5	865	153,8	30
CN030	46,5	865	153,8	30

Bu büyütme sonuçlarında elde edilen numunelerden theta-2 theta taraması iyi kalitede (pik düzgünlüğü ve yüksekliğine bakarak) olanlarının üzerinde sallantı eğrileri yapılmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 6-3’ de özetlenmiştir.

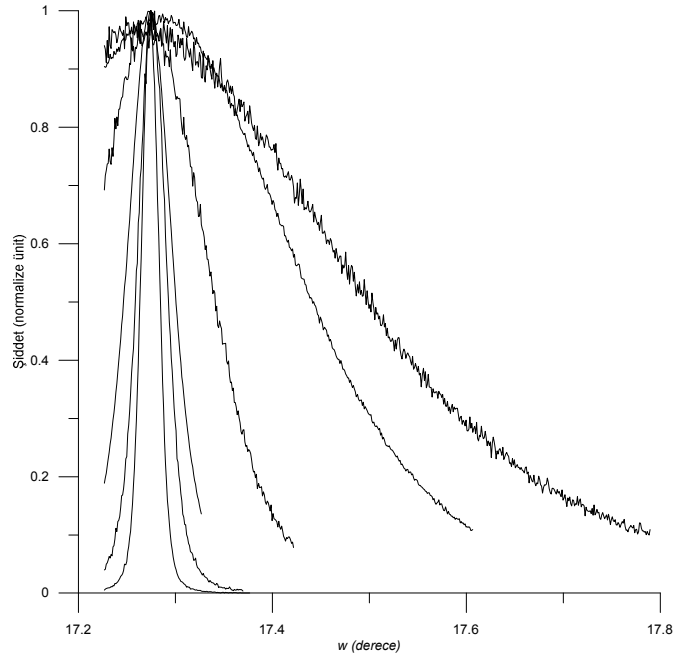
Örnek olarak CN005 numunesine ait theta-twotheta taraması Şekil 6-1’ de ve (00.2) GaN sallantı eğrisi ise Şekil 6-2’ de verilmiştir. Şekil 6-1’ de sağdaki (00.6) safir alttaş ve soldaki (00.2) GaN pikidir.



Şekil 6.1: CN006 numunesine ait theta-twotheta taraması.



Şekil 6.2: CN006 numunesine ait (00.2) GaN sallantı eğrisi



Şekil 6.3: CN001, CN005, CN021, CN022, CN027, CN030, numunelerine ait (00.2) GaN sallantı eğrisi.

Şekil 6.3’ de görsel kıyaslama için bazı numunelere ait (00.2) GaN sallantı eğrileri verilmiştir.

Çizelge 6.3: Seçilmiş numunelerde yapılan sallantı eğrilerinin sonuçları.

Numune No	FWHM (00.2) arcsec
CN001	1440,0
CN005	816,7
CN006	1083,6
CN015	925,2
CN016	777,6
CN021	760,8
CN022	1253,2
CN027	320,0
CN029	775,0
CN030	365,0

Çizelge 6.4: Hall ölçüm sonuçları.

Numune No	Tabaka Taşıyıcı Yoğ. Cm^{-2}	Külçe Taşıyıcı Yoğ. Cm^{-3}	Mobilite Cm^2/Vs
c-015	9,59E+13	2,4E+17	58,2
c-025	3,49E+13	1,07E+17	47,3
c-026	2,06E+13	6,07E+16	66,73
c-027	7,12E+13	2,37E+16	66,73
c-028	3,09E+13	8,88E+16	37,49
c-029_2	6,68E+13	2,26E+17	79,67
c-030	3,82E+13	9,72E+16	45,72

Bu parametreler kullanılarak büyütülen CN028-CN30’u da içerecek şekilde yapılan ve arka plan katkılama oranının (kirliliğinin) Hall ölçüm sonuçları ise Çizelge 6.4’ te verilmiştir. Alınan kontakların kalitesinin de ölçüm sonuçlarını etkileyeceği göz önünde bulundurulmasına rağmen değerlerin oldukça tutarlı olduğu görülmektedir. Bu değerler literatürde bulunan değerler ile tutarlıdır (In-Hwan Lee, 2004).

6.2. Katkılı GaN Çalışması

6.2.1. n-tipi katkılama

Temel parametreler belirlendikten sonra ikinci aşamada p ve n tipi katkılanmış GaN numunelerin büyütmesine geçildi. Büyütmelerde p tipi katkı için metal organik gaz olan Cp_2Mg dan Mg ve n tipi katkılama için ise Silane dan elde edilen Si kullanıldı. Çizelge 6.5’ de n katkılı GaN büyütmek için kullanılan parametrelerin özeti verilmiştir.

Çizelge 6.5: Si katkılı GaN için büyütmeye çalışması.

Numune No	Çekirdeklenme				Yeniden Kristallenme		Tampon			Genel Büyütme				
	Süremi	Sıcaklık C	Altaş Dönme Akışı (ccm)	V/III Oranı	Süre min	Sıcaklık C	Süremi	Sıcaklık C	V/III Oranı	Süre	Sıcaklık C	V/III Oranı	Altaş Dönme Akışı (ccm)	Silane Akışı (ccm)
CN031	3,5	480	25	150	3	865	33	865	154	65	890	100	30	10,0
CN032	4,8	480	25	150	3	865	33	865	154	65	890	100	30	2,0
CN033	4,2	480	25	150	3	865	48	865	154	65	890	100	30	2,0
CN034	4,2	480	25	150	3	865	48	865	154	65	890	100	30	0,5
CN035	4,2	480	25	150	3	865	48	865	154	65	890	100	30	5,0
CN036	4,2	480	25	150	3	865	48	865	154	65	890	100	30	8,4
CN037	3,7	480	25	150	3	865	48	865	154	65	890	100	30	6,0

Bu numunelerden CN035,036 ve 037 üzerinde yapılan HALL ölçümleri ise Çizelge 6.6, Çizelge 6.7 ve Çizelge 6.8’ de verilmiştir.

Çizelge 6.6: CN035 nolu numune için alınan Hall ölçümleri.

Hall Katsayısı (cm ³ /C)	Tabaka Taşıyıcı Yoğunluğu (1/cm ²)	Hall Mobilitesi (cm ² /(V.s))	Külçe Taşıyıcı Yoğunluğu (1/cm ³)	Özdirenç (Ohm.cm)	Manyetik Alan (Gauss)
3,1	2,51E+17	155,1	2,02E+21	19,89	1000
3,1	2,50E+17	155,6	2,02E+21	19,89	2000
3,1	2,50E+17	155,7	2,02E+21	19,89	3000
3,1	2,50E+17	155,9	2,01E+21	19,89	4000
3,0	2,50E+17	155,6	2,02E+21	19,89	5000

Çizelge 6.7: CN036 nolu numune için alınan Hall ölçümleri.

Hall Katsayısı (cm ³ /C)	Tabaka Taşıyıcı Yoğunluğu (1/cm ²)	Hall Mobilitesi (cm ² /(V.s))	Külçe Taşıyıcı Yoğunluğu (1/cm ³)	Özdirenç (Ohm.cm)	Manyetik Alan (Gauss)
0,7	1,11E+18	127,3	8,37E+21	5,86	1000
0,7	1,12E+18	126,8	8,40E+21	5,86	2000
0,7	1,11E+18	127,8	8,34E+21	5,86	3000
0,7	1,12E+18	127,1	8,38E+21	5,86	4000
0,7	1,12E+18	127,0	8,39E+21	5,86	5000

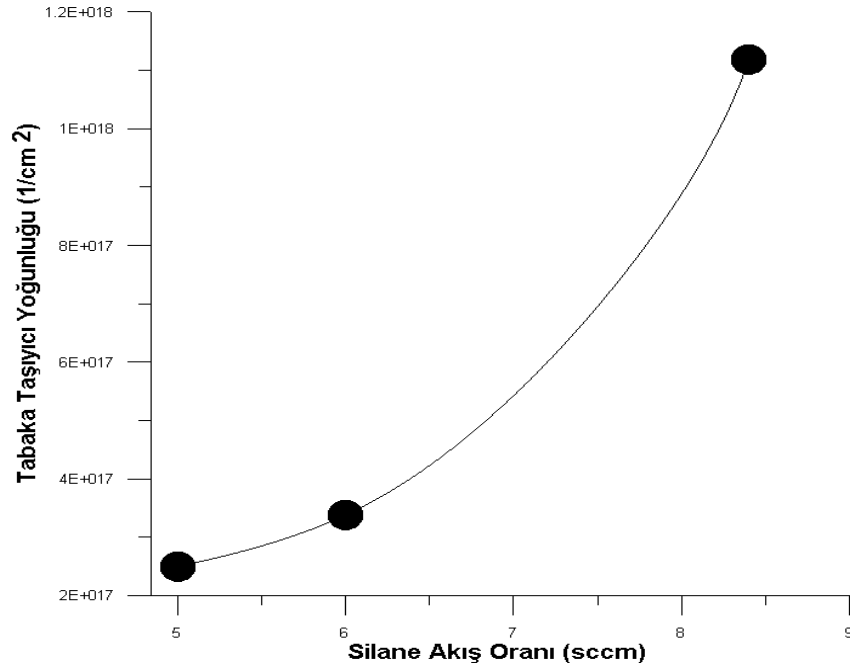
Çizelge 6.8: CN037 nolu numune için alınan Hall ölçümleri.

Hall Katsayısı (cm ³ /C)	Tabaka Taşıyıcı Yoğunluğu (1/cm ²)	Hall Mobilitesi (cm ² /(V.s))	Külçe Taşıyıcı Yoğunluğu (1/cm ³)	Özdirenç (Ohm.cm)	Manyetik Alan (Gauss)
18	3,38E+17	193,3	3,38E+21	9,56	1000
1,8	3,38E+17	192,9	3,38E+21	9,56	2000
1,8	3,39E+17	192,5	3,39E+21	9,56	3000
1,8	3,38E+17	192,7	3,38E+21	9,56	4000
1,8	3,39E+17	192,6	3,34E+21	9,56	5000

CN035, CN036 ve CN037 numaralı numunelerdeki SiH₄ akış oranının Hall katsayısı, tabaka taşıyıcı yoğunluğu, külçe taşıyıcı yoğunluğu ve mobiliteye etkisi incelenmiş ve sonuçları Çizelge 6.9’ da verilmiştir. Şekil 6.4’ de ise tabaka taşıyıcı yoğunluğunun silane akış oranına bağlılığı verilmiştir.

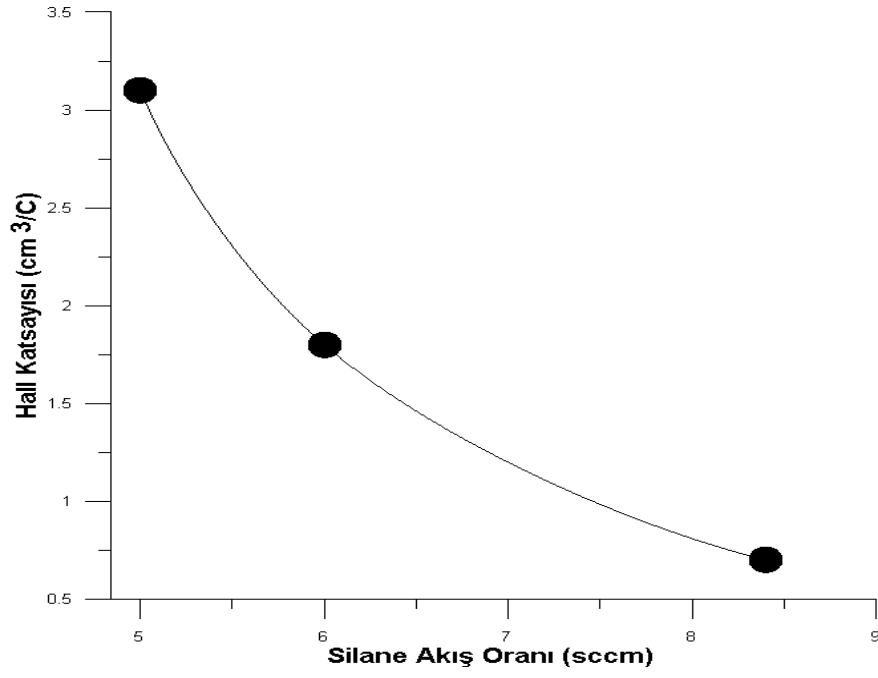
Çizelge 6.9: Farklı numunelerin SiH_4 akış oranına bağlılığı verilmiştir.

Numune	Tabaka Taşıyıcı Yoğunluğu ($1/\text{cm}^2$)	Mobilite ($\text{cm}^2/(\text{V.s})$)	Külçe Taşıyıcı Yoğunluğu ($1/\text{cm}^3$)	Hall Katsayısı [cm^3/C] :	SiH_4 Akışı (sccm)
CN035	2,50E+17	155,5	2,02E+21	3,1	5,0
CN036	1,12E+18	127,1	8,38E+21	0,7	8,4
CN037	3,38E+17	192,8	3,37E+21	1,8	6,0

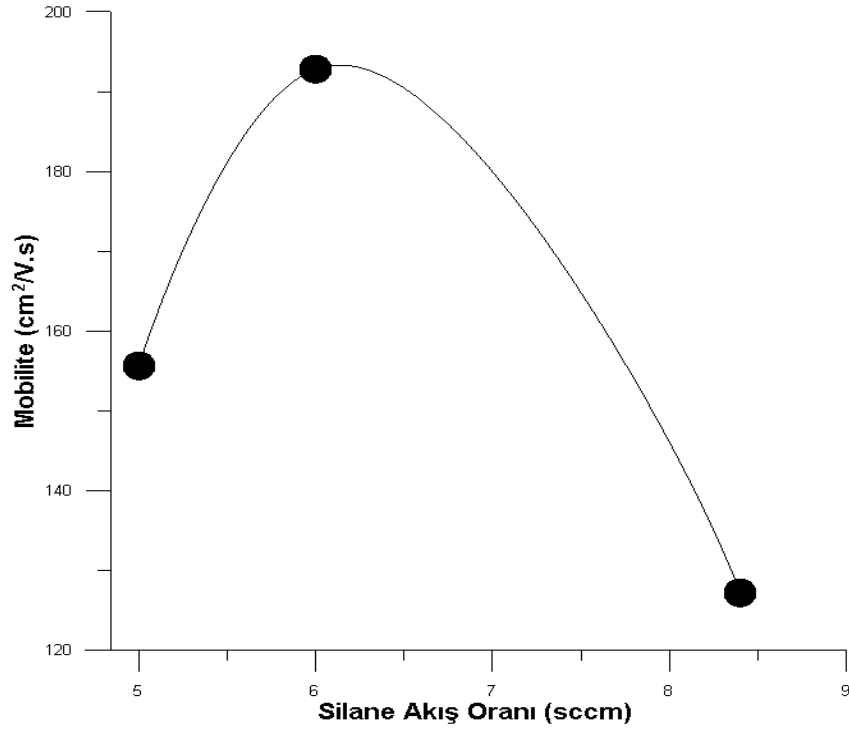


Şekil 6.4: Tabaka taşıyıcı yoğunluğunun SiH_4 akış oranı ile değişimi.

Şekil 6.5' de Silane akış oranının Hall katsayısına bağlılığı ve Şekil 6.6' da ise Silane akış oranının mobiliteye etkisine bakılmıştır.



Şekil 6.5 : Silane akış oranının Hall katsayısına etkisi.



Şekil 6.6 : Silane akış oranının mobiliteye etkisi.

Şekil 6.4' de Silane akış oranını artırdıkça tabaka taşıyıcı yoğunluğunun arttığı görülmektedir. Dolayısıyla hangi mertebede tabaka taşıyıcı olmasını istiyorsak uygun Silane akışını ayarlamalıyız. Şekil 6.5' de Silane akışının Hall katsayısına etkisi gösterilmiştir. Taşıyıcı yoğunluğunun artan Silane akış oranını ile arttığını Şekil 6.4' de verildiğini gördük ve Hall katsayısının taşıyıcı yoğunluğu ile ters orantılı olduğunu

bildiğimizden artan Silane akış oranının Hall katsayısını azalacağı açıktır. Şekil 6.6’ da ise Silane akış oranının mobiliteye etkisi bakılmıştır. Mobilité değerimiz belli bir Silane akış değerine kadar armış daha sonra azalma eğilimindedir. Silane akış oranının taşıyıcı yoğunluğunun artmasına olanak sağladığından iç çarpışmaların artması ile mobilité azalmıştır. Sonuç olarak uygun Silane akış oranında yüksek mobilitéye sahip bir yarıiletken üretebiliriz.

6.2.2. p-tipi katkılama

CN038, CN042 ve CN043 numaralı numunelerde p-tipi katkılama çalışmaları yapılmıştır. Büyütmelere ait parametreler Çizelge 6.10’ de özetlenmiştir. p-tipi katkılama Mg kullanılarak yapılmıştır. CN042 nolu numunede çekirdeklenme tabakası olarak düşük sıcaklıkta AlN diğerlerinde ise GaN kullanılmıştır. Her iki durumda da p-tipi katkılama yapılmıştır. p-tipi katkılamayı etkinleştirmek için 85 °C yaklaşık 55 dakika azot atmosferinde tavlama yapılmıştır. Bu numuneler için alınan Hall ölçümleri Çizelge 6.11, Çizelge 6.12 ve Çizelge 6.13’ de sırasıyla verilmiştir.

Çizelge 6.10: Mg katkılı GaN büyütmeye çalışması.

Numune No	Çekirdeklenme				Yeniden Kristallenme		Tampon			Genel Büyütme				
	Süremin	Sıcaklık C	Altaş Dönme Akışı (ccm)	V/III Oranı	Süremin	Sıcaklık C	Süremin	Sıcaklık C	V/III Oranı	Süremin	Sıcaklık C	V/III Oranı	Altaş Dönme Akışı (ccm)	Mg Kaynak Akışı (ccm)
CN038	3,67	480	25	150	3	865	47,5	865	153,8	50	865	130,0	30	125
CN042	3,67	480	25	150	3	865	47,5	865	153,8	50	865	144,4	20	200
CN043	3,67	480	25	150	3	865	47,5	865	153,8	50	865	130,0	20	90

Çizelge 6.11: CN038 nolu numune için alınan ölçümler.

Hall Katsayısı (cm ³ /C)	Tabaka Taşıyıcı Yoğunluğu (cm ⁻²)	Hall Mobilitesi (cm ² /(V.s))	Külçe Taşıyıcı Yoğunluğu (cm ⁻³)	Özdirenç (Ohm.cm)	Manyetik Alan (Gauss)
9,71	3,54E+13	10,53	6,43E+17	0,92	1000
17,11	2,00E+13	18,54	3,65E+17	0,92	2000
14,58	5,32E+13	10,58	9,67E+17	0,92	3000
11,67	2,94E+13	12,65	5,35E+17	0,92	4000

Çizelge 6.12: CN042 nolu numune için alınan ölçümler.

Hall Katsayısı (cm ³ /C)	Tabaka Taşıyıcı Yoğunluğu (cm ⁻²)	Hall Mobilitesi (cm ² /(V.s))	Külçe Taşıyıcı Yoğunluğu (cm ⁻³)	Özdirenç (Ohm.cm)	Manyetik Alan (Gauss)
6,92	4,96E+13	8,18	9,02E+17	0,85	1000
6,91	4,97E+13	8,17	9,03E+17	0,85	2000
7,09	4,84E+13	8,38	8,80E+17	0,85	3000
7,00	4,91E+13	8,27	8,93E+17	0,85	4000

Çizelge 6.13: CN043 nolu numune için alınan ölçümler.

Hall Katsayısı (cm ³ /C)	Tabaka Taşıyıcı Yoğunluğu (cm ⁻²)	Hall Mobilitesi (cm ² /(V.s))	Külçe Taşıyıcı Yoğunluğu (cm ⁻³)	Özdirenç (Ohm.cm)	Manyetik Alan (Gauss)
12,75	2,69E+13	8,75	4,90E+17	1,46	1000
12,74	2,70E+13	8,73	4,90E+17	1,46	2000
12,72	2,70E+13	8,72	4,91E+17	1,46	3000
12,69	2,71E+13	8,70	4,92E+17	1,46	4000

Çizelge 6.14 : CN038, CN042 ve CN043 nolu numunelerin Cd_2Mg akış oranına bağlılıkları.

Numune	Tabaka Taşıyıcı Yoğunluğu (cm^{-2})	Hall Mobilitesi ($cm^2/(V.s)$)	Külçe Taşıyıcı Yoğunluğu (cm^{-3})	Hall Katsayısı (cm^3/C)	Cd_2Mg Akış oranı Sccm
CN038	3,45E+13	13,07	6,27E+17	13,27	125
CN042	4,91E+13	8,25	8,78E+17	6,98	200
CN043	2,70E+13	8,73	4,91E+17	12,73	90

Çizelge 6.11, Çizelge 6.12 ve Çizelge 6.13’ de değişen manyetik alan altında Hall katsayısı, tabak taşıyıcı yoğunluğu, Hall mobilitesi, külçe taşıyıcı yoğunluğu ve dirence etkisi verilmiştir. Çizelge 6.14’ de ise Cd_2Mg akış oranının numunelerdeki etkisi verilmiştir.

6.3. Sonuç

Bu çalışmalar sonucunda (0001) yönelimli tek kristal safir alttaşı üzerine GaN ve AlN ara tabakaları ve bu tabakalar üzerine de n-tipi ve p-tipi GaN epitaksiyel ince film MOCVD sistemi ile büyütülmüştür. Bu büyütülen epitaksiyel ince filmlerden başarılı şekilde kontak alınmıştır. Kontak alındıktan sonra büyütülen GaN yapısının taşıyıcı tipinin yani n-tipi ya da p-tipi oluşturulduğunu Hall sistemi ile kontrol ederek istenilen yapının olduğu gözlenmiştir. Bu yapılarda istenilen katkılama için ayarlama ve optimizasyon çalışması yapılmıştır. Büyütülen epitaksiyel GaN ince filmlerinin elektriksel karakterizasyonları Hall sistemi ile yapılmış, akış oranlarının külçe ve tabaka taşıyıcı yoğunluklarına, Hall mobilitesine ve Hall katsayısına etkisi incelenerek araştırılmıştır. Çalışmalar sonucunda iyi kalitede ve istenen düzeyde katkılama yapılabilen Safir üzerine epitaksiyel n-GaN ve p-GaN ince filmlerin büyütülebildiği gösterilmiştir.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel bilgiler

Adı Soyadı	İsmail ALTUNTAŞ
Doğum Yeri ve Tarihi	Sivas, 07/05/1986
Medeni Hali	Bekar
Yabancı Dil	İngilizce
İletişim Adresi	Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 58140-Sivas
E-posta Adresi	ialtuntas@cumhuriyet.edu.tr

Eğitim ve Akademik Durumu

Lise	Yenişehir Lisesi, 2003
Lisans	Cumhuriyet Üniversitesi, 2009
Yüksek Lisans	Cumhuriyet Üniversitesi, 2012

İş Tecrübesi

Cumhuriyet Üniversitesi Araştırma görevlisi, 2011-

Kaynakça

- A study of semi-insulating GaN grown on AlN buffer/sapphire substrate by metalorganic chemical vapor deposition*2006*Journal of Crystal Growth* 273-277
- A.F. Wright, J. N. (1995). *Applied Physics Letters* , 66,3465.
- Armen, G. B. (2007). *Hall Effect Experiment*.
- Aydoğın, D. D. (2011). *Katıhal Fiziğı*. Ankara: Nobel Yayın.
- Bour, F. P. (1997). Nitride-based semiconductor for blue and green light emitting devices. *Nature* .
- Brillson, L. J. (1982). *The Surface and Properties of Metal-Semiconductor Interfaces*. Surf. Sci. Reports.
- Changes in the growth mode of low temperature GaN buffer layers with nitrogen plasma nitridation of sapphire substrates*1997*Applied Physics Letters* 1228-1230
- Cho, E. (2009). *GaN BASED HETEROSTRUCTURE GROWTH AND APPLICATION TO ELECTRONIC DEVICES AND GAS SENSORS*.
- Daghero, D. *Resistivity measurements the conventional and Van der Pauw techniques*.
- Demir, İ. (2011). *Safir Alttaşı Üzerine Büyütülen GaN Epitaksial Tek Kristal İnce Filmlerin XRD Yöntemiyle İncelenmesi*. Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas.
- E.H. Rhoderick, R. W. (1988). *Metal-Semiconductor Contacts* 2nd ed. Clarendon Press, Oxford, 1-3.
- Ekinci, H. (2008). *Metal-Organik Kimyasal Buharlaştırma Yöntemi ile Kristal Büyütme Sisteminin İncelenmesi*. Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas.
- GaN Growth Using GaN Buffer Layer*1991*Japanese Journal of Applied Physics* 1705-1707
- GaN: Processing, defects, and devices*1999*Journal of Applied Physics* 1-78
- H. Amano, N. S. (1986). *Applied Physics Letters* , 48, 353.
- H. Amono, M. K. (1989). *Japanese Journal of Applied Physics* , 28,L2112.
- H.M.Manasevit, F. E. (1971). *J. Electrochem. Soc.* , 118,1864.
- H.Morkoç, S. (1992). *GaN,AlN and InN:a review*.
- III-Nitride UV Devices*2005*Japanese Journal of Applied Physics* 7191-7206
- Influences of nitridation and thermal annealing on GaN buffer layers and the property of subsequent GaN epilayers grown by MOCVD*1999*Superficies y Vacio* 26-29

- In-Hwan Lee, C.-R. L. (2004). Correlations between photoluminescence and Hall Mobility in GaN/Sapphire grown by MOCVD. 260 (304-308).*
- J. Wu, W. W. (2003). Solid State Communications , 127,411.*
- J. Wu, W. W. (2003). Physica Status Solid (B) , 240,412.*
- J.N.Kuznia, M. K. (1993). Influence of buffer layers on the deposition of high quality single crystal GaN over sapphire substrates. Journal of Applied Physics , 4700-4702.*
- Jones, S. W. (2008). Photolithography.*
- Lake-Shore, K. K.*
- Lişesivdin, S. B. (2008). AlGaIn/GaN Temelli Yüksek Elektron Hareketlilikli Transistörlerin (HEMT) Elektron ve Manyeto İletim Özellikleri LKLD. Gazi Üniversitesi, Ankara.*
- M. Ueno, M. Y. (1994). Condensed Matter. Physical Review B , 49,14.*
- M.J. Deen, F. P. (2006). Electrical characterization of semiconductor materials and devices . J Mater Sci: Mater Electron , 549–575.*
- M.Manasevit. (1968). Applied Physics Letters , 11-156.*
- Microstructure of GaN laterally overgrown by metalorganic chemical vapor deposition1998Applied Physics Letters 747-749*
- Morkoç, H. (1999). Nitride Semiconductors and Devices. Springer.*
- Nitridation process of sapphire substrate surface and its effect on the growth of GaN1996Journal of Applied Physics Letters 3487-3491*
- Önal, B. (2009). GaP Yarıiletkeni ile Hazırlanan Metal-Yarıiletken Kontakların Elektiriksel Özelliklerinin İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Ankara.*
- P.Perlin, C. J.-C. (1992). Condensed Matter. Physical Review B , 45,83.*
- Perloff, D. (1977). Four-Point probe sheet resistance correction factors for thin rectangular samples. Solid-State Electron , 681-687.*
- R. Chwang, B. S. (1974). Contact size effects on the van der Pauw method for resistivity and Hall coefficient measurement. Solid State Electron , 1217-1227.*
- S. Nakamura, T. M. (1992). J. Applied Physics , 71,5543.*
- S.A. Smith, C. W. (1997). High rate and selective etching of GaN, AlGaIn, and AlN using an inductively coupled plasma. Appl. Phys. Lett. , 3631-3633.*
- S.J. Pearton, J. C. (1999). GaN: Processing, defects,. Journal of Applied Physics , 1,78.*

S.M.Hasan.Ahmer. (2006). Integral Quantum Hall Effect.

Sharma, B. (1984). *Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions and Their Applications*. New York, : Plenum Press.

Tekeli, Z. (2009). *Nitrit Temelli (III-V) Yarıiletken Heteroyapıların Morfolojik ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi*. Gazi Üniversitesi.

W. Utsumi, H. S. (2003).

W.Utsumi, H. K. (2003). *Nature Materials* 2 (s. 735). içinde

Xia, Q. X. (1993). *Journal of Applied Physics* , 73,8198.