



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



Yüksek Lisans Tezi

**DÜŞÜK BOYUTLU FERROMANYETİK ALAŞIMLARIN
OPTOELEKTRONİK ÖZELLİKLERİNİN KRİSTAL
YÖNELİMLERİNE BAĞLI OLARAK İNCELENMESİ**

Shemshat KERİMOVA

Fizik Anabilim Dalı

Katıhal Fiziği Programı

**DANIŞMAN
Doç. Dr. Ömer DÖNMEZ**

Mart 2021

İSTANBUL

Bu çalışma, 5.03.2021 tarihinde aşığıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı, Katıhal Fiziğı Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Doç. Dr. Ömer DÖNMEZ(Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Doç. Dr. Mustafa GÜNEŞ
Adana Alparslan Türkeş Bilim ve
Teknoloji Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Ayşe EROL
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

İntihal Programı Beyanı

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi’nin aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans öğrenim hayatım boyunca bilgi ve tecrübelerini paylaşan, her zaman hissettirdiği güven duygusuyla cesaretlendirici olan değerli hocam, araştırma süresince her konuda yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Doç. Dr. Ömer DÖNMEZ'e sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımla sunarım.

Birçok bilim insanı adayına ışık tutarak yol gösteren değerli hocam Prof. Dr. Ayşe EROL'a en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Doç. Dr. Mustafa GÜNEŞ'e tez çalışmasında kullandığım örnekleri sağladığı için teşekkür etmeyi borç bilirim.

Yüksek lisans çalışmam boyunca deneysel çalışmalarında gösterdikleri tüm desteklerden dolayı Araş. Gör. Dr. Fahrettin SARCAN, Öğr. Gör. Dr. Furkan KURUOĞLU ve Araş. Gör. Dr. Selman MUTLU hocalarıma sonsuz teşekkür ediyorum. Yarattıkları sıcak ortam ve tüm yardımları için Dr. Öğr. Üyesi. Saffettin YILDIRIM, Doç. Dr. Ferhat NUTKU, Dr. Öğr. Üyesi. Kamuran KARA KOÇ hocalarıma ayrı ayrı teşekkürlerimi iletiyorum

Deneysel çalışmalarında her zaman yanımda olan, sıkıntılarımı paylaştığım, yüksek lisans çalışmalarım boyunca yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen ve çalışmalarım süresince gösterdikleri güler yüz ve sağladıkları sıcak çalışma ortamı için çok değerli dostlarım Araş. Gör. Göksenin KÖMÜRCÜ'ye, Mustafa AYDIN'a, Ümit DOĞAN'a Osman Emin TOPAL'a ve Danyal MERCAN'a teşekkür ederim.

Yüksek lisansa başladığım ilk günden bugüne kadar Nano-Optoelektronik Araştırma Grubunun bir parçası olmuş olan herkese teşekkür ediyorum.

Tüm hayatım boyunca verdiğim kararlara saygı duyarak beni destekleyen ve bana güvenen anne ve babama sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Son on yılımı güzelleştiren, hayatımda karşılaştığım her türlü zorluğun üstesinden gelmeme destek veren, beni her konuda cesaretlendiren ve bana güvenen, hayat ve yol arkadaşım Serdar KERİMOV'a yaşattığı ve yaşatacağı her güzel an ve duygu için en içten teşekkür ediyorum.

Mart 2021

Shemshat KERİMOVA

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ.....	xi
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	xiii
ÖZET	xvi
SUMMARY	xviii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR.....	3
2.1. FARKLI KRİSTAL DOĞRULTULARINDA III-V GRUBU ALAŞIMLARIN OPTİK VE ELEKTRONİK ÖZELLİKLERİ	3
2.2. SEYRELTİK MANYETİK YARIİLETKENLER (DMS)	7
2.2.1. Mn Katkılı III-V Yarıiletkenler	8
2.2.2. (III-V) Seyrelik Manyetik Yarıiletkenlerin Büyütülmesi	8
2.2.3. (Ga, Mn) As'in yapısal özellikleri	11
2.2.4. (Ga, Mn) As'in elektronik bant yapısı	11
2.2.5. Ga _{1-x} Mn _x As alaşımının optik özellikleri	14
2.2.6. Ga _{1-x} Mn _x As alaşımının elektriksel özellikleri	17
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	20
3.1. ÖRNEKLERİN YAPISI	20
3.1.1. GaAs/AlAs Kuantum Kuyulu Örnekler	20
3.1.2. Ga _{0.999} Mn _{0.001} As Kuantum Kuyulu Örnekler	21
3.2. ÖRNEK FABRİKASYONU	22
3.2.1. Kristal Kesme	24
3.2.2. Kimyasal Temizleme İşlemi	25
3.2.3. Fotodirenç Kaplanması	26
3.2.4. Pozlama	27
3.2.5. Islak Aşındırma İşlemi	28
3.2.6. Metalizasyon İşlemi	31
3.2.7. Isıl İşlem	34

3.2.8. Tel Bağlama.....	35
3.3. ÖRNEKLERİN KARAKTERİZASYONU	39
3.3.1. Optik Karaterizasyon.....	39
3.3.2. Elektro-optik karakterizasyon.....	41
3.3.3. Optik geçiş enerjilerin Comsol ile kuramsal hesaplaması.....	45
4. BULGULAR.....	49
4.1. FOTOYANSIMA SONUÇLARI.....	49
4.2. FOTOİLETKENLİK SONUÇLARI.....	52
4.3. KURAMSAL HESAPLAMA SONUÇLARI.....	55
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	67
KAYNAKLAR.....	72
ÖZGEÇMİŞ	78

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: III-V grubu ikili yarıiletkenler ve üçlü alaşımlar için örgü sabiti-bant aralığı grafiği [13]. Düz çizgiler direk bant aralığını, kesikli çizgiler indirek bant aralığını göstermektedir.	4
Şekil 2.2: Birim stereografik üçgen. Oklar, düzlem dönüşümünü gösterir [15].	5
Şekil 2.3: (011) yönü boyunca görüntülenen ev sahibi GaAs kristalinin enine kesiti. (100), (011), (111), (211) ve (311) düzlemleri belirtilmiştir [15].	6
Şekil 2.4: Mn atomlarının olası konumlarına sahip GaAs temel birim hücresi [45].	9
Şekil 2.5: GaMnAs alaşımlarında örgü sabitinin Mn konsantrasyonu ile değişimi [44].	10
Şekil 2.6: $Ga_{1-x}Mn_xAs$ alaşımının valans ve safsızlık bant kenar enerjilerinin Mn kompozisyonunun fonksiyonu olarak kayması.	12
Şekil 2.7: Bant aralığının gerilimin ve Mn kompozisyonunun fonksiyonu olarak değişimi [21].	13
Şekil 2.8: Kuantum kuyu genişliğinin a) 2.5 nm b) 20 nm ve c) sonsuz kalınlıkta (külçe) olduğu GaMnAs alaşımının safsızlık bandının (yeşil bant) kuantizasyonunun şematik şekli [50].	14
Şekil 2.9: Farklı Mn kompozisyonlarda PL şiddetinin, emisyon enerjisinin bir fonksiyonu olarak değişimi [38].	15
Şekil 2.10: (100), (110), (311)B ve (411)B doğrultularında büyütülmüş a) GaAs/AlAs ve b) GaMnAs/AlAs (Mn=0.1%) için PL spektrumu. Grafikler [46] no'lu referanstan alınmıştır.	16
Şekil 2.11: Farklı Mn konsantrasyonları ve büyütme sıcaklıklarına sahip 6 nm kuantum kuyulu malzemeler (QW) için normalize edilmiş PL spektrumları [58].	17
Şekil 2.12: Mn hücre sıcaklığının bir fonksiyonu olarak farklı altta sıcaklıklarda büyütülmüş Mn alaşımlı GaMnAs alaşımlarda a) boşluk mobilitesi ve b) boşluk taşıyıcı yoğunluğu [31].	18
Şekil 3.1: Mn'sız GaAs/AlAs kuantum kuyulu örneklerin yapısı.	21
Şekil 3.2: Mn alaşımlı $Ga_{0.999}Mn_{0.001}As/AlAs$ kuantum kuyulu örneklerin yapısı.	22
Şekil 3.3: Pozitif ve negatif fotodirençlerin farkı.	23

Şekil 3.4: Örneğin elmas uçlu kalem ile uygun bir şekilde istenilen boyutlarda kesilmesi.	25
Şekil 3.5: Döndürerek fotodirenç kaplama yönteminin adımları.	26
Şekil 3.6: Şerit kontak (simple bar) şeklinde oluşturulmuş maske. Gri kısımlar krom olup kuartz üzerine kaplanmıştır.	28
Şekil 3.7: Aşındırma sonrasında profilmetrede ölçülen örneğin kalınlığı.	31
Şekil 3.8: Metal yarıiletken heteroyapıların band yapıları a) $\phi_m > \phi_s$ n-tipi yarıiletken, b) $\phi_m > \phi_s$ p-tipi yarıiletken, c) $\phi_m < \phi_s$ n-tipi yarıiletken, d) $\phi_m < \phi_s$ p-tipi yarıiletken.	32
Şekil 3.9: Şerit kontak (simple bar) şeklinde oluşturulmuş kuartz üzerine krom kaplı kontak maske.	34
Şekil 3.10: a) Telin ucuna elektrik kıvılcım (spark) uygulama b) Oluşan kıvılcım sonucu altın telin ucu eriyerek top oluşumu c) Örnek yüzeyine ilk bağın yapılması d) Tel bağlandıktan sonra örnek yüzeyinden uzaklaşması e) Kapılarınin seramik pedin kontağına doğru ilerlemesi f) Seramik ped üzerine bağ yapılması g) Tel bağlama işleminin sonlanması.	36
Şekil 3.11: Örneklerin fabrikasyon sürecinin şematik gösterimi.	38
Şekil 3.12: Spektral yansıma ölçüm düzeneği.	40
Şekil 3.13: Gelen fotonun soğrulmasının şematik diagramı a) hem elektronların hem de boşlukların oluşturulmasını içeren banttan banda geçişler, b) bantdan safsızlık seviyesine geçişler – yalnızca tek tür taşıyıcı oluşturulur.	42
Şekil 3.14: Fotoiletkenlik ölçümleri için deney düzeneği.	44
Şekil 4.1: (100), (110), (311)B ve (411)B doğrultularında büyütülmüş GaAs/AlAs kuantum kuyulu örneklerin PR ölçüm sonuçları. a) En üst katman olan GaAs bant aralığından küçük bölgeye ait sonuçlar ve b) GaAs bant aralığından büyük bölgeye ait sonuçlar.	50
Şekil 4.2: (100), (110), (311)B ve (411)B doğrultularında büyütülmüş GaMnAs/AlAs kuantum kuyulu örneklerin PR ölçüm sonuçları. a) En üst katman olan GaAs bant aralığından küçük bölgeye ait sonuçlar ve b) GaAs bant aralığından büyük bölgeye ait sonuçlar verilmiştir.	51
Şekil 4.3: a) (311)B ve b) (411)B yönelimlerindeki GaAs/AlAs örneklerin ve c) (311)B ve d) (411)B yönelimlerindeki GaMnAs/AlAs örneklerin PC spektrumu.	53
Şekil 4.4: a) (311)B ve b) (411)B yönelimlerindeki GaAs/AlAs örneklerin ve c) (311)B ve d) (411)B yönelimlerindeki GaMnAs/AlAs örneklerin normalize edilmiş PC spektrumu.	54
Şekil 4.5: (100) doğrultusundaki GaAs/AlAs kuantum kuyulu yapının İletkenlik bandı düzenlenmesi. Sırasıyla, mavi ve yeşil renk 1. ve 2. kuantize enerji seviyesinin	

dalga fonksiyonlarını göstermektedir. Herbir dalga fonksiyonunun konumu, enerji özdeğerine göre çizdirilmiştir.....	55
Şekil 4.6: (100) doğrultusundaki GaAs/AlAs kuantum kuyulu yapının ağır boşluk için valans bandı düzenlenmesi. Sırasıyla, mavi, yeşil, kırmızı ve turkuaz renk 1., 2., 3. ve 4. kuantize enerji seviyesinin dalga fonksiyonlarını göstermektedir. Herbir dalga fonksiyonunun konumu, enerji özdeğerine göre çizdirilmiştir.....	56
Şekil 4.7: (100) doğrultusundaki GaAs/AlAs kuantum kuyulu yapının hafif boşluk için Valans bandı düzenlenmesi. Sırasıyla, mavi ve yeşil renk 1. ve 2. kuantize enerji seviyesinin dalga fonksiyonlarını göstermektedir. Herbir dalga fonksiyonunun konumu, enerji özdeğerine göre çizdirilmiştir.....	56
Şekil 4.8: (100) doğrultusundaki GaAs/AlAs kuantum kuyulu yapının iletkenlik bandı ve ağır boşluk için valans bandı düzenlenmesi. E_{e1} (pembe) ve E_{hh1} (yeşil) 1. kuantize seviyesi için elektron ve ağır boşlukların dalga fonksiyonları. Herbir dalga fonksiyonunun konumu, enerji özdeğerine göre çizdirilmiştir.....	57
Şekil 4.9: (100) doğrultusundaki GaAs/AlAs kuantum kuyulu yapının iletkenlik bandı ve ağır boşluk için valans bandı düzenlenmesi. E_{e2} (pembe) ve E_{hh2} (yeşil) 2. kuantize seviyesi için elektron ve ağır boşlukların dalga fonksiyonları. Herbir dalga fonksiyonunun konumu, enerji özdeğerine göre çizdirilmiştir.....	57
Şekil 4.10: (100) doğrultusundaki GaAs/AlAs kuantum kuyulu yapının iletkenlik bandı ve hafif boşluk için valans bandı düzenlenmesi. E_{e1} (pembe) ve E_{lh1} (yeşil) 1. kuantize seviyesi için elektron ve hafif boşlukların dalga fonksiyonları. Herbir dalga fonksiyonunun konumu, enerji özdeğerine göre çizdirilmiştir.....	58
Şekil 4.11: (100) doğrultusundaki GaAs/AlAs kuantum kuyulu yapının iletkenlik bandı ve hafif boşluk için valans bandı düzenlenmesi. E_{e2} (pembe) ve E_{hh2} (yeşil) 2. kuantize seviyesi için elektron ve ağır boşlukların dalga fonksiyonları. Herbir dalga fonksiyonunun konumu, enerji özdeğerine göre çizdirilmiştir.....	58
Şekil 4.12: (100) doğrultusundaki GaAs/AlAs kuantum kuyulu yapının iletkenlik bandı ve spin orbit bandı düzenlenmesi. E_{e2} (pembe) ve E_{hh2} (yeşil) 2. kuantize seviyesi için elektron ve boşlukların dalga fonksiyonları. Herbir dalga fonksiyonunun konumu, enerji özdeğerine göre çizdirilmiştir.....	59
Şekil 4.13: (100) doğrultudaki GaAs/AlAs kuantum kuyulu örneğin geçiş enerji seviyeleri.....	60
Şekil 4.14: (100) doğrultusundaki GaMnAs/AlAs kuantum kuyulu yapının iletkenlik bandı düzenlenmesi. Sırasıyla, mavi ve yeşil renk 1. ve 2. kuantize enerji seviyesinin dalga fonksiyonlarını göstermektedir. Herbir dalga fonksiyonunun konumu, enerji özdeğerine göre çizdirilmiştir.....	61
Şekil 4.15: (100) doğrultusundaki GaMnAs/AlAs kuantum kuyulu yapının ağır boşluk için valans bandı düzenlenmesi. Sırasıyla, mavi, yeşil, kırmızı ve turkuaz renk 1., 2., 3. ve 4. kuantize enerji seviyesinin dalga fonksiyonlarını göstermektedir. Herbir dalga fonksiyonunun konumu, enerji özdeğerine göre çizdirilmiştir.....	62

- Şekil 4.16:** (100) doğrultusundaki GaMnAs/AlAs kuantum kuyulu yapının hafif boşluk için Valans bandı düzenlenmesi. Sırasıyla mavi ve yeşil renk 1. ve 2. kuantize enerji seviyesinin dalga fonksiyonunu göstermektedir. Dalga fonksiyonunun konumu, enerji özdeğerine göre çizdirilmiştir.....62
- Şekil 4.17:** (100) doğrultusundaki GaMnAs/AlAs kuantum kuyulu yapının iletkenlik bandı ve ağır boşluk için valans bandı düzenlenmesi. E_{e1} (pembe) ve E_{hh1} (yeşil) 1. kuantize seviyesi için elektron ve ağır boşlukların dalga fonksiyonları. Herbir dalga fonksiyonunun konumu, enerji özdeğerine göre çizdirilmiştir.....63
- Şekil 4.18:** (100) doğrultusundaki GaMnAs/AlAs kuantum kuyulu yapının iletkenlik bandı ve ağır boşluk için valans bandı düzenlenmesi. E_{e1} (pembe) ve E_{lh1} (yeşil) 1. kuantize seviyesi için elektron ve ağır boşlukların dalga fonksiyonları. Herbir dalga fonksiyonunun konumu, enerji özdeğerine göre çizdirilmiştir.....63
- Şekil 4.19:** (100) doğrultusundaki GaMnAs/AlAs kuantum kuyulu yapının iletkenlik bandı ve hafif boşluk için valans bandı düzenlenmesi. E_{e1} (pembe) ve E_{so} (yeşil) 1. kuantize seviyesi için elektron ve hafif boşlukların dalga fonksiyonları. Herbir dalga fonksiyonunun konumu, enerji özdeğerine göre çizdirilmiştir.....64
- Şekil 4.20:** (100) doğrultusundaki GaMnAs/AlAs kuantum kuyulu yapının iletkenlik bandı ve hafif boşluk için valans bandı düzenlenmesi. E_{e1} (pembe) ve E_{lh1} (yeşil) 1. kuantize seviyesi için elektron ve ağır boşlukların dalga fonksiyonları. Herbir dalga fonksiyonunun konumu, enerji özdeğerine göre çizdirilmiştir.....64
- Şekil 4.21:** (100) doğrultusundaki GaAs/AlAs kuantum kuyulu yapının iletkenlik bandı ve spin orbit bandı düzenlenmesi. E_{e2} (pembe) ve E_{hh2} (yeşil) 2. kuantize seviyesi için elektron ve boşlukların dalga fonksiyonları. Herbir dalga fonksiyonunun konumu, enerji özdeğerine göre çizdirilmiştir.....65
- Şekil 4.22:** (100) doğrultudaki GaMnAs/AlAs kuantum kuyulu örneğin geçiş enerji seviyeleri.....66

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Farklı doğrultulardaki GaAs ve AlAs için boşluk etkin kütleleri [19].....	7
Tablo 3.1: GaAs için aşındırıcıların karışım ve aşındırma oranları [63].....	30
Tablo 3.2: Metal/yarıiletken kontakların elektriksel yapısı.....	33
Tablo 3.3: Bu çalışmada izlenen fabrikasyon adımları.	37
Tablo 3.4: (100) doğrultusundaki GaAs/AlAs için kullanılan parametreler. AlAs için verilen parametreler Γ -vadisi içindir.	46
Tablo 3.5: (100) doğrultusundaki GaMnAs/AlAs için kullanılan parametreler.....	46
Tablo 3.6: Örneklerin bant aralığı ve valans ve iletkenlik bandı için süreksizlik değerleri.....	47
Tablo 4.1: PR spektrumundan GaAs/AlAs örnekleri için belirlenen optik geçiş enerjileri.....	52
Tablo 4.2: PR spektrumundan GaMnAs/AlAs örnekleri için belirlenen optik geçiş enerjileri.....	52
Tablo 4.3: PC spektrumundan (311) ve (411) doğrultularındaki Mn'sız örnekler için elde edilen optik geçiş enerji seviyeleri.....	54
Tablo 4.4: PC spektrumundan (311) ve (411) doğrultularındaki Mn'lı örnekler için elde edilen optik geçiş enerji seviyeleri.	54
Tablo 4.5: (100), (110), (311) ve (411) doğrultularındaki GaAs (Γ)/AlAs (Γ) örneklerin geçiş enerji seviyesi.....	60
Tablo 4.6: (100), (110), (311) ve (411) doğrultularındaki GaMnAs (Γ)/AlAs (Γ) örneklerin optik geçiş enerjileri.....	66
Tablo 5.1: GaAs/AlAs örnekler için PR deney sonuçlarına karşılık gelen kuramsal sonuçların olası optik geçiş enerjileri. Tabloda belirlenemeyen optik geçiş türleri soru işareti ile gösterilmiştir.	68
Tablo 5.2: GaAs/AlAs örnekler için PC deney sonuçlarına karşılık gelen kuramsal sonuçların olası optik geçiş enerjileri. Tabloda belirlenemeyen optik geçiş türleri soru işareti ile gösterilmiştir.	68

Tablo 5.3: GaMnAs/AlAs örnekler için PR deney sonuçlarına karşılık gelen kuramsal sonuçların olası optik geçiş enerjileri. Tabloda belirlenemeyen optik geçiş türleri soru işareti ile gösterilmiştir.	70
Tablo 5.4: GaMnAs/AlAs örnekler için PC deney sonuçlarına karşılık gelen kuramsal sonuçların olası optik geçiş enerjileri. Tabloda belirlenemeyen optik geçiş türleri soru işareti ile gösterilmiştir.	71



SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
α	: Absorbsiyon katsayısı
a	: Termal genleşme katsayısı
β	: Debye sıcaklığı
d	: Tabaka kalınlığı
ΔE_v	: Valans bant ofseti
ΔE_c	: İletkenlik bant ofseti
e	: Elektron yükü
E	: Enerji
E_c	: Yarıiletkenin iletkenlik bandı
E_e	: Elektronların enerji seviyesi
E_h	: Boşlukların enerji seviyesi
E_F	: Yarıiletkenin Fermi enerjisi
E_g	: Yarıiletkenin bant aralığı enerjisi
E_{gb}	: Bariyer tabakanın bant aralığı
E_{gw}	: Kuyu tabakanın bant aralığı
E_{tr}	: Optik geçiş enerjisi
E_{gw}	: Kuyu tabakanın bant aralığı
E_v	: Yarıiletkenin valans bandı
ϵ_{xx}	: Gerilim katsayısı
$\emptyset$	: Faz açısı
ϕ_m	: Metalim iş fonksiyonu
ϕ_s	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu
ψ	: Kuantum mekaniksel dalga fonksiyonu
G	: Elektron – boşluk oluşum hızı
h	: Planck sabiti
hh	: Ağır boşluk
H	: Hamiltonyen
i	: Sanal birim
lh	: Hafif boşluk

m_0	: Elektronun boşluktaki kütlesi
m_{hh}^*	: Ağır boşlukların etkin kütlesi
m_{lh}^*	: Hafif boşlukların etkin kütlesi
m	: Kritik nokta tipine bağlı sabit
μ	: Mobilite
μ_n	: Elektronların mobilitesi
μ_p	: Boşlukların mobilitesi
n	: Elektron yoğunluğu
p	: Boşluk yoğunluğu
R	: Yansıma katsayısı
σ	: İletkenlik
$\tau_{n,p}$	: Elektron ve boşlukların ortalama yaşam süresi
V	: Potansiyel enerji
ν	: Frekans
x	: Kompozisyon miktarı
x_{Mn}	: Mn kompozisyon miktarı

Kısaltmalar

Açıklama

CVD	: Chemical Vapor Deposition metodu
CB	: İletkenlik bandı
DI	: De-iyonize
DMS	: Seyreltik manyetik yarıiletken (Diluted Magnetic Semiconductor)
ER	: Elektroyansım (Electroreflectance)
FCC	: Yüze merkezli kübik (Face Centered Cubic)
FM	: Ferromanyetizma (Ferromagnetism)
FWHM	: Yarı maksimumdaki tam genişlik (Full Width at Half Maximum)
GMR	: Dev magnetizasyon (Giant Magnetoresistance)
HH	: Ağır boşluk (Heavy Hole band)
IB	: Safsızlık bandı (Impurity Band)
LPE	: Sıvı faz epitaksi (Liquid Phase Epitaxy)
LT	: Düşük sıcaklık (Low Temperature)
MBE	: Moleküler demet epitaksisi (Molecular Beam Epitaxy)
PC	: Fotoiletkenlik (Photoconductivity)

PL	: Fotolüminesans (Photoluminescence)
PR	: Fotoyansıtma (Photoreflectance)
PVD	: Physical Vapor Deposition metodu
QW	: Kuantum kuyu (Quantum Well)
SCR	: Uzay yük bölgesi (Space Charge Region)
TDF	: Üçüncü türev sinyal formu (Third Derivative Functional Form)
VB	: Valans bandı



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DÜŞÜK BOYUTLU FERROMANYETİK ALAŞIMLARIN OPTOELEKTRONİK ÖZELLİKLERİNİN KRİSTAL YÖNELİMİNE BAĞLI OLARAK İNCELENMESİ

Shemshat KERİMOVA

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Ömer DÖNMEZ

Bu tez çalışmasında, optik özelliklerin kristal doğrultularına bağlı olarak değişimin belirlenmesi için, moleküler beam epitaxy (MBE) yöntemi ile (100), (110), (311)B ve (411)B doğrultularında GaAs yarı-yalıtkan alttaş üzerine büyütülmüş Mn'lı $\text{Ga}_{0.999}\text{Mn}_{0.001}\text{As/AlAs}$ kuantum kuyulu ve Mn alaşımsız GaAs/AlAs kuantum kuyulu yarıiletkenler incelenmiştir. Optik geçiş enerjileri kuramsal olarak hesaplanmış ve fotoiletkenlik ve foto yansıtma deneysel tekniklerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Fotoiletkenlik ölçümlerinin yapılabilmesi için (100), (110), (311)B ve (411)B doğrultularında büyütülmüş Mn alaşımlı ve Mn alaşımsız tüm örnekler Hall Bar ve şerit kontak geometrisinde fabrikasyonları yapılmıştır.

Hall olayı ölçüm sonucundan taşıyıcı konsantrasyonun optik geçiş enerjisini etkileyecek kadar büyük olmadığı belirlenmiştir. Bu yüzden optik geçişlerin hesaplanmasında Schrödinger denkleminin çözülmesinin yeterli olacağı tespit edilmiştir.

Deney sonuçları, kuramsal olarak hesaplanan olası optik geçiş enerjileri ile karşılaştırılarak analiz edilmiştir. AlAs/GaAs kuantum kuyusu örneklerin düşük sıcaklıkta büyütülmesinden dolayı, GaAs bant aralığından daha düşük enerjili optik geçişler gözlenmiştir. Optik bant aralığının kristal yönelimi ile değiştiği tespit edilmiştir.

Mn'in GaAs içerisine katılması ile bant aralığında kırmızıya kayma gözlenmiştir. Optik bant aralığının, kristal yönelimine Mn'sız AlAs/GaAs örneğine göre daha fazla bağlı olduğu belirlenmiştir. Yerel enerji seviyelerinin optik geçiş üzerine etkisinin daha düzensiz olduğu gözlenmiştir. Örneklerin, kusurlar nedeniyle kompanse olmasından dolayı ferromanyetik etki gözlenememiştir.

Hem Mn'sız hem de Mn'lı örneklerde, deneysel ve kuramsal hesaplama sonuçlarının birlikte analiz edilmesiyle; i) yüksek enerjili kuantize enerji seviyelerin geçişleri olduğu, ve ii) yasak geçişlerin veya indirek geçişlerin olabileceği tespit edilmiştir.

Tez kapsamında yapılan çalışmalar İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü bünyesinde yer alan Nano ve Optoelektronik Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Mart 2021, 97 sayfa.

Anahtar kelimeler: Seyretilik Mn'lı yapılar, Optik özellikler, Ferromanyetik alaşımlar, Optik geçişler, Yüksek indisli kristal düzlemleri

SUMMARY

M.Sc. THESIS

INVESTIGATION OF OPTOELECTRONIC PROPERTIES OF LOW DIMENSIONAL FERROMAGNETIC SEMICONDUCTOR ALLOYS WITH DIFFERENT CRYSTAL ORIENTATION

Shemshat KERIMOVA

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Sciences

Department of Physics

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Ömer DÖNMEZ

In these thesis optical properties of diluted magnetic semiconductor $\text{Ga}_{0.999}\text{Mn}_{0.001}\text{As}/\text{AlAs}$ quantum well and Mn-free GaAs/AlAs quantum well structures grown by molecular beam epitaxy (MBE) on semi-insulating GaAs substrates with orientations (100), (110), (311)B and (411)B are investigated. Optical transition energies were theoretically calculated and compared with the results obtained from photoreflectance (PR) and photoconductivity (PC) experimental techniques.

Mn-free and Mn-containing samples, grown on (100), (110), (311)B and (411)B orientations, were fabricated in Hall Bar and simple bar geometry in order to make photoconductivity measurements.

From the Hall measurements, it was concluded that the carrier concentration is not large enough to affect the optical transition energy. Therefore, it has been determined that solving the Schrödinger equation will be sufficient for the calculation of the optical transition.

The experimental results were analyzed by comparing them with theoretically calculated optical transition energies. Optical transitions below the bandgap of GaAs are observed due to the low-temperature growth of the AlAs/GaAs quantum well structures. It is found that the optical bandgap is almost dependent of the crystal orientation.

Introducing Mn into GaAs causes redshift of the bandgap. The optical bandgap energy of the GaMnAs is more sensitive than Mn-free GaAs samples. The effect of the localized state on the optical transition is more random than the Mn-free samples. We do not detect the ferromagnetic effect due to the compensation phenomena.

Analyzing of experimental results with the theoretical calculation give i) high energy quantized states contribute optical transitions, and ii) forbidden or indirect transition may contribute optical transitions.

The fabrication process was carried out at Advanced Lithography Laboratory/Istanbul University Science Faculty Physics Department. All measurements during this thesis, were carried out by using facilities of Nano- and Optoelectronics Research Laboratories/Istanbul University Science Faculty.

March 2021, 97 pages.

Keywords: Dilute alloys with Mn, Optical properties, Ferromagnetic alloys, Optical transition, High index crystal planes

1. GİRİŞ

Son yıllarda nanoteknoloji, fizik, kimya, mühendislik ve biyoloji gibi bir çok alanda en önemli ve heyecan verici alanlardan biri haline geldi. Nanoteknoloji, bize yakın gelecekte geniş bir uygulama yelpazesinde teknolojik gelişmelerin yönünü değiştirecek birçok atılım sağlama konusunda büyük umut vaat etmektedir ve çağdaş bilim ve endüstri için devasa olanaklar sunmaktadır [1]. Nanoteknoloji, 100 nanometreden daha küçük parçacıklardan (nanometre bir metrenin milyarda biridir) veya aktif bölge büyüklüğünde elde edilen nanoyapılara yeni fiziksel ve kimyasal özellikler kazanmasına dayanır. Bu ölçekte üretilen malzemeler, kritik bir boyuttan daha küçük hale geldiğinde, elektronik bant yapısı, elektriksel iletkenlik, erime sıcaklığı ve mekanik özellikleri gibi birçok parametrelerin değiştiği gözlenmiştir [2].

Geleneksel elektronik cihazlar, örneğin silisyum gibi, bir yarıiletkende bilginin depolanması ve transportu (taşıma) negatif ve pozitif yüklü elektron ve boşluklar ile sağlanır. Ancak şimdilerde, elektronun yükünden ziyade spininden yararlanarak daha küçük, daha hızlı ve daha verimli çalışması ve tamamen yeni işlevsellik kazandırmak için elektronların spin özelliğinden yararlanarak dikkat çekici yeni nesil “spintronik” cihazlar ve devre elemanları inşa etmeye çalışılmaktadır. Spintronik (spin transport elektronu veya spin tabanlı elektronik) adı verilen bu teknolojiye bilgiyi taşıyan elektron yükü değil, elektron spinidir ve bu, standart mikroelettronu taşıyıcının spini ile malzemenin manyetik özellikleri arasındaki etkileşimden ortaya çıkan, spin bağımlı etkilerle birleştiren yeni nesil cihazlar için fırsatlar sunmaktadır [3]. Malzemelerin spin özelliğinin kullanılması için kendiliğinden manyetik özellik gösteren malzemeler veya yarıiletken içerisine manyetik özellik gösteren elementlerin katılması veya manyetik özellik gösteren elementlerden yararlanarak manyetik özellik gösteren yarıiletkenlerden yararlanılmaktadır [4]. Manyetik özelliğe sahip elementlerin yarıiletken içerisine katılması veya alaşımlanması ile belirli bir sıcaklıktan itibaren manyetik özellik gösteren yapılar, ferromanyetik davranış, yaygın olarak kullanılmaktadır. Ferromanyetik yarıiletkenler için bir çok farklı alaşım yarıiletkenler kullanılmaktadır [5, 6]. Bu yarıiletken alaşımlardan birisi GaMnAs alaşımıdır. Bu alaşım içerisinde seyreltik oranda Mn varlığı GaMnAs’in, GaAs alaşımının yapısal özellikleri üzerinde çok fazla değişim yapması beklenmez. GaAs yarıiletkeninin optik ve elektriksel özellikleri halihazırda çok iyi bilinmektedir. Bu özelliklerin GaAs için nasıl kontrol edileceği için yol haritasının belirlenmiş

olması, GaMnAs alaşımları için benzer reçetelerin geçerli olacağı beklentisi olduğu için özellikle ilgi çekicidir. Bu cazip özelliklerine rağmen, GaMnAs alaşımlarının temel fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için yapılan çalışmalar, daha çok (100) yönelimine sahip yapılar üzerine yoğunlaşmıştır. Farklı kristal doğrultularında, optik ve elektriksel özelliklerin değiştiği yaygın olarak bilinmektedir. Bu nedenle GaMnAs'li alaşımlar için temel fiziksel özelliklerin kristal yönelimine bağlı olarak belirlenmesi önemli bir husustur.

Spintroniklerin oldukça aktif bir araştırma alanına dönüşmesi, 1988'de Baibich ve diğ. tarafından [7] dev manyetorezistansın (giant magnetoresistance, GMR) keşfi ile geldi ve bir cihazın taşıma özelliklerinin yalnızca spin manipülasyonu yoluyla önemli ölçüde değiştirilebileceğini gösterdi. GMR etkisi, malzemedeki elektronların spinini hizalamak için bir manyetik alan kullanıldığında ve bir malzemenin direncinde büyük bir değişikliğe neden olduğunda ortaya çıkar [8]. Bu spintronik teknolojisine dayalı yeni cihazların avantajları, geleneksel yarıiletken cihazlara kıyasla kararlılığı, veri işleme hızının artması, elektrik güç tüketiminin azalması ve entegrasyon yoğunluklarının artması olacaktır [3]. GaMnAs yarıiletkeni, belirli kritik sıcaklığın altında ferromanyetik özellik gösterdiği için, GaAs tabanlı spintronik aygıtlarında performans artışı olması beklenmektedir. GaMnAs içerisinde seyreltik oranda Mn bulunması sayesinde, mevcut teknolojiye entegrasyonu diğer alternatiflerine göre daha kolay olması beklenmektedir. Ancak, bu konuda yapılan çalışmalar daha çok (100) doğrultusunda büyütülmüş alaşım yarıiletken üzerine yoğunlaştığı anlaşılmıştır [9, 10].

Bu tez çalışması, seyreltik manyetik yarıiletkenler (DMS) adı verilen bir malzeme sınıfının temel özellikleri ve davranışları ile ilgilidir. Üzerinde çalışılan malzemeler farklı kristal yönelimleri/doğrultularına sahip olup, farklı kristal doğrultularının temel özelliklerinin de incelenmesine yöneliktir.

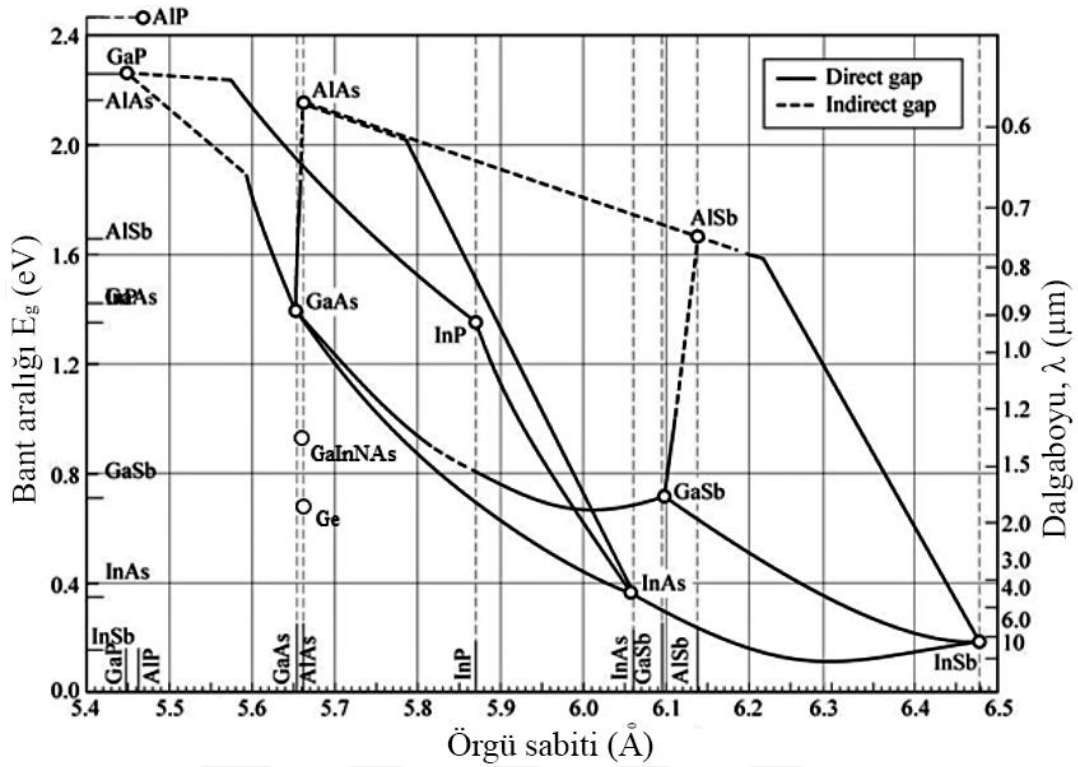
2. GENEL KISIMLAR

2.1. FARKLI KRİSTAL DOĞRULTULARINDA III-V GRUBU ALAŞIMLARIN OPTİK VE ELEKTRONİK ÖZELLİKLERİ

Birçok modern elektronik cihazlar (örneğin, entegre devreler) silisyum malzemeye dayanmaktadır. Fakat, Si tabanlı aygıtlar, GaAs'li olanlar ile karşılaştırıldığında daha düşük taşıyıcı mobilitesi ve indirek bant aralığına sahip olduğundan yüksek hızlı ve yüksek frekansta çalışan elektronik ve optoelektronik aygıt uygulamalarında üst limit değerlerini sınırlandırmaktadır. Bu nedenle, III–V grubu yarıiletken ailesi, hem elektromanyetik radyasyonun algılanması (dedektör) ve üretimi (ışık kaynağı) için optoelektronik cihazlar alanında direk bantlı yarıiletkenler olduğu için daha yüksek hızlı elektronik cihazlarda geniş bir uygulama alanı sunar.

Alaşım miktarı hassas şekilde kontrol edilerek, belirli cihaz gereksinimlerine uyacak belirli bir yarıiletken özelliği (bant aralığı gibi) seçmek mümkündür. Bu gibi durumlarda, bu bileşikler tipik olarak GaAs veya InP gibi alttaş üzerinde heterojonksiyon sistemlerinde epitaksiyel katmanlar olarak büyütülür. Heteroyapıların epitaksiyel büyütülmesinde dikkate alınması gereken önemli parametrelerden biri, epitaksiyel katman ile alttaş arasındaki örgü sabiti uyumsuzluğudur. Örgü sabitini uyumsuzluğunun büyüklüğü, epitaksiyel katmanda dislokasyonların oluşmasına neden olabilir. Şekil 2.1'de bilinen III-V grubu bileşiklerden alaşımlama ile elde edilebilecek alaşım yarıiletkenlerin bant aralığı-örgü sabiti değişimi verilmektedir. III-V grubu GaAs, GaInAs, AlGaAs gibi alaşımların (100) yönelimindeki optik ve elektriksel özellikleri yeterince çalışılmış ve bilinmektedir [11, 12] Bu nedenle (100) yönelimli kristallerde optik ve elektrik özellikler hakkında bilgi verilmeyecektir.

III-V grubu GaAs, GaInAs, AlGaAs gibi yarıiletkenlerin (100) yönelimindeki temel fiziksel özellikleri atomların yerleşimine bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle, farklı kristal doğrultularında bant aralığı, etkin kütle ve örgü sabiti gibi önemli parametrelerinin değişmesi beklenmektedir. Ayrıca, yapısal kusurlar da kristal yönelimlerine bağlı olarak değişmektedir.

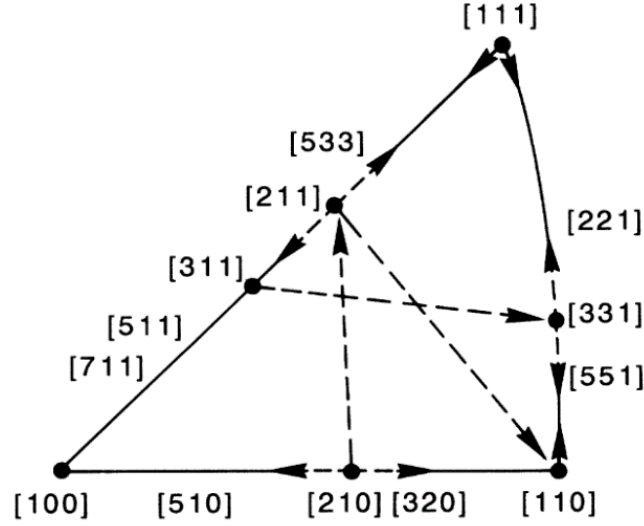


Şekil 2.1: III-V grubu ikili yarıiletkenler ve üçlü alaşımlar için örgü sabiti-bant aralığı grafiği [13]. Düz çizgiler direk bant aralığını, kesikli çizgiler indirek bant aralığını göstermektedir.

Farklı kristal doğrultularında, kristal yüzeyindeki atom(lar) değiştiği için alaşım veya birleşik yarıiletkenlerde birim hücre içerisinde kalan atom sayıları da değişmektedir. Bu değişim kristal yapısına bağlı olan optik ve elektrik özelliklerinin değişmesine neden olmaktadır. Bundan başka da farklı yüzeylerin atomik yapısı, kristal büyütme, aşındırma ve fabrikasyon süreçlerinde farklılıklar olmasına neden olmaktadır. Bu farklı kristal yüzeyleri üç tip olarak sınıflandırılır: yüzey enerjisinde yerel minimumlara karşılık gelen yüksek simetriye sahip *tekil* (singular) olan düzlemlerle (düşük Miller indisli yüzeyleri), tekil düzlemlerin yakınında bulunan *yakın/komşu* (vicinal) düzlemler ve diğer tüm *tekil olmayan* (nonsingular) düzlemler [14]. Tekil olmayan yüzeylerin, (110) ve (111) arasında bulunan (331) düzlemi, (100) ve (111) arasında bulunan (311) düzlemi ve (100) ve (110) arasında bulunan (210) düzlemi olarak bilinen üç önemli grubu ayırt edilmiştir [15].

Nötzel ve diğ. (1992) tarafından yüksek ve düşük indisli GaAs yüzeylerin incelemesinde, genel olarak, Şekil 2.2’de gösterildiği gibi tekil olmayan yüzeylerin tekil yüzey konfigürasyonlarına ayrıldığını, tekil yüzeylerin ise komşu (vicinal) düzlemlere dönüştüğünü gözlemiştir. (011)

yönü boyunca görüntülenen ev sahibi GaAs kristalinin bir enine kesiti Şekil 2.3’de verilmektedir.



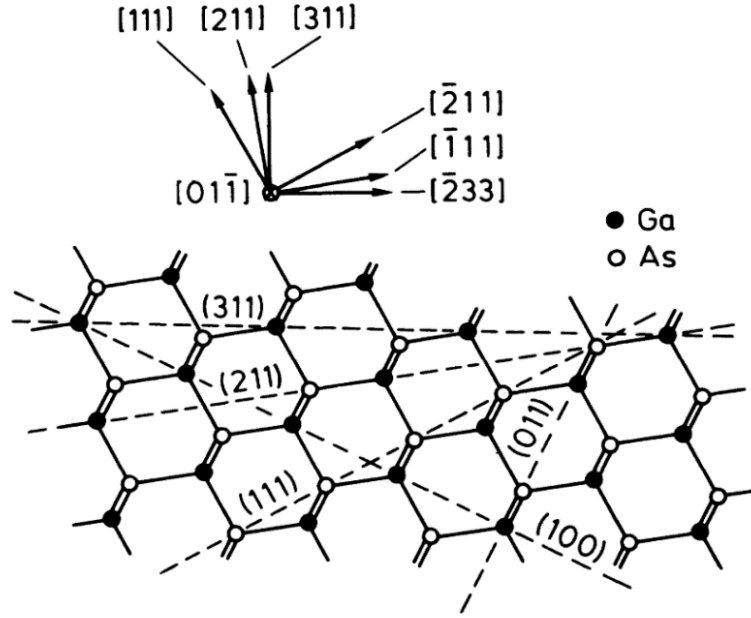
Şekil 2.2: Birim stereografik üçgen. Oklar, düzlem dönüşümünü gösterir [15].

(331) ve (110) yüzeylerinde periyodik adım dizileri, (311) yüzeyinde periyodik kanallar, (111) yüzeyinde simetrik piramitler, (211) yüzeyinde tek yönde asimetric piramitler ve (210) yüzeyinde iki yönde asimetric piramitler olduğu gözlenmiş ve bu yüzey yapıları gerçekten de GaAs/AlAs çok katmanlı yapıların elektronik özelliklerinde ortaya çıkan MBE sırasında kuantum tel ve kuantum nokta yapılarının doğrudan oluşumuyla sonuçlanmaktadır [15].

(001) doğrultusu dışındaki altaşlar üzerinde büyütülen ince film tabakalarında gözlenen benzersiz optik ve elektronik özelliklerden dolayı farklı doğrultularda büyütülmüş malzemelere olan ilgi artmıştır. Heteroyapılı malzemelerin büyümesinde yararlı olabilecek bileşik yarıiletkenlerin yüksek Miller indisli yüzeylerinin sergilediği atomik ve elektronik yapı çeşitliliği, bu malzemeleri çalışma için ilginç yüzeyler haline getirmektedir [16].

Han ve diğ. (2012) tarafından yapılan çalışmalarda (311) doğrultusunda büyütülmüş GaAsN malzemenin (100) doğrultusunda büyütülmüş malzemeye göre fotoluminesans (PL) şiddetinin arttığı ve yarı maksimumdaki tam genişliğin (FWHM) daraldığı gözlenmiştir. Aynı şekilde farklı çalışmalarda hem (311)B doğrultusunda GaAs altaş üzerinde büyütülmüş GaAsN, GaAsSb, ve

AlGaInP bulk filmlerin lüminesans özellikleri (100) doğrultusunda GaAs alttaş üzerinde büyütülmüş filmlerden daha gelişmiş olduğu gözlenmiştir [17, 18].



Şekil 2.3: (011) yönü boyunca görüntülenen ev sahibi GaAs kristalinin enine kesiti. (100), (011), (111), (211) ve (311) düzlemleri belirtilmiştir [15].

Yüksek Miller indisli alttaş yüzeylerinde büyütülmüş malzemelerin elektronik bant yapısının alttaş doğrultusuna bağlı olarak değiştiği gözlenmiş ve kuramsal hesaplamalar, valans bandının elektronik yapısının büyük ölçüde alttaş doğrultusuna bağlı olduğunu göstermiştir [19]. Houn ve diğ. (1988), (001), (110) ve (111) doğrultularında büyütülmüş GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs kuantum kuyulu yapıların valans bandı içerisinde oluşan alt bant yapılarını incelemişler. (110) doğrultudaki kuantum kuyusu alt bandının oldukça anizotropik olduğunu ve (110) yönü boyunca alt bandın düz olduğu, (001) yönü boyunca ise bandın çok dik olduğu bulunmuştur. (110) doğrultusundaki etkin kütle, (001) doğrultusundan çok daha büyük olduğu için, boşluklar (001) yönü boyunca çok daha hızlı hareket etme eğilimindedir bundan dolayı anizotropi, büyük ölçüde boşlukların transportunu etkilemektedir [19]. Tablo 2.1’de (001), (110) ve (111) doğrultularında büyütülen GaAs ve AlAs alttaşları için ağır boşluk (m_{hh}^*) ve hafif boşluk (m_{lh}^*) etkin kütleleri verilmiştir.

Tablo 2.1: Farklı doğrultulardaki GaAs ve AlAs için boşluk etkin kütleleri [19].

Alttaş	(001)		(111)		(110)	
	m_{hh}^*	m_{lh}^*	m_{hh}^*	m_{lh}^*	m_{hh}^*	m_{lh}^*
GaAs	0.38	0.09	0.95	0.08	0.71	0.08
AlAs	0.40	0.18	0.11	0.14	0.83	0.15

Bundan başka da Zaied ve diğ. (2013) tarafından (001), (111), (114) ve (115) doğrultularında GaAs alttaş üzerine büyütülmüş GaAs numunelerin büyüme karakteristikleri ve yüzey morfolojileri incelenmiş ve numuneler arasında yüzey morfolojisinde belirgin farklılıklar gözlenmiştir. Yapılan çalışmalarda (001) ve (111)A GaAs alttaş doğrultuları için GaAs yüzeyinin pürüzsüz olduğu ve (114) ve (115) doğrultulardaki numuneler için yüzey morfolojisinin pürüzsüz olmadığı gösterilmiştir ve büyüme oranları da (111)A>(114)A~(115)A>(001) olarak değiştiği SEM görüntülerinin kesit alanından bulunmuştur [20].

2.2. SEYRELTİK MANYETİK YARIİLETKENLER (DMS)

DMS malzemeleri, aynı malzeme içindeki hem yarıiletken hem de manyetik özelliklerin birleşimi nedeniyle son yıllarda büyük ilgi görmüştür. DMS'lerin ana fikri, manyetik iyonları manyetik olmayan yarıiletken malzemeler ile alaşımlayarak, yerel manyetik momentleri bulk yarıiletkenlere eklemektir. Ferromanyetik özellikler sergileyen yarıiletkenler, üstün elektrik özelliklerinin yanı sıra potansiyel uygulamalar arasında, yük taşıyıcılarının spin özelliklerini de kullanabilen yeni nesil cihazların kapısını açmaktadır. Geleneksel yarıiletken yük tabanlı elektroniğe spin serbestlik derecesi eklemek veya tek başına spin serbestlik derecesini kullanmak, elektronik cihazlara önemli ölçüde daha fazla yetenek ve performans katacaktır.

DMS, manyetik safsızlıklar ile alaşımlanmış yarıiletkenlerdir ve buyüzden klasik yarıiletkenlerin aksine, bant aralığı enerjisi veya manyetizma gibi fiziksel özellikler artık sadece parçacık boyutunun değil, aynı zamanda örgü geriliminin ve alaşımlama miktarının da bir fonksiyonudur [21]. Ferromanyetizmanın çok yönlü yarıiletken özelliklerle kombinasyonu, gelecekteki spintronik uygulamaları için umut verici olmasını sağlar.

2.2.1. Mn Katkılı III-V Yarıiletkenler

1980'lerde, kapsamlı olarak incelenen DMS malzemeleri II-Mn-VI, alaşımlarıydı. Fakat, çoğu II-VI tabanlı DMS yalnızca paramanyetik veya antiferromanyetik davranış sergilediği gözlenmiştir [22]. Bu, manyetik iyon dağılımının rastgeleliği ile birlikte, ulaşılabilen en düşük sıcaklıklarda bile dış bir manyetik alan yokluğunda düzensiz spin yönelimlerine neden olmuştur [5]. Ayrıca, II-Mn-VI alaşımlı malzemeler yalıtkan olma eğiliminde olduklarından elektron veya boşluk sağlayıcılar ile alaşımlamak zordur [23]. Daha sonra, başka bir DMS sisteminin, yani III-Mn-V grubu ailesinin, gözle görülür bir ferromanyetizma sergilediği bulunmuştur [24, 25]. III-Mn-V grubu alaşım malzemelerinde ferromanyetizmanın bulunmasından dolayı, bu malzemeleri DMS araştırmalarının ön saflarına taşıdı [26].

Mn katkılı III-V grubu ferromanyetik yarıiletkenler, geleneksel yarıiletken teknolojisiyle uyumluluğu nedeniyle, bilgi taşımak için elektronların (boşlukların) hem yük hem de spin serbestlik derecelerini kullanan yeni bir teknoloji olan spintronik uygulamalar için potansiyel bir aday olduklarından, son on yıllarda kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

Bazı Mn katkılı III-V malzemelerde, ışığın varlığı paramanyetik iyonları ferromanyetik düzene koyar ve bu da yarıiletkenlerde optik olarak kontrol edilebilen ferromanyetizma ile sonuçlanır [27]. Bundan başka da, bu malzemeler, alan etkili bir transistör yapısı ile ferromanyetizmanın elektrik alan kontrolünü göstermek için kullanılmıştır [28].

GaMnAs özellikleri ve nanoyapıları hakkında birçok deneysel ve teorik çalışmalar olmasına rağmen, bu çalışmaların çoğu (100) alttaşı üzerinde büyütülmüş GaMnAs ile sınırlıdır [29-31]. Fakat, son zamanlarda, GaMnAs katmanlarının (100) dışındaki, yüksek indisli alttaş üzerinde büyütülmüş GaMnAs'in özellikleri de ilgi görmüştür [32-34]

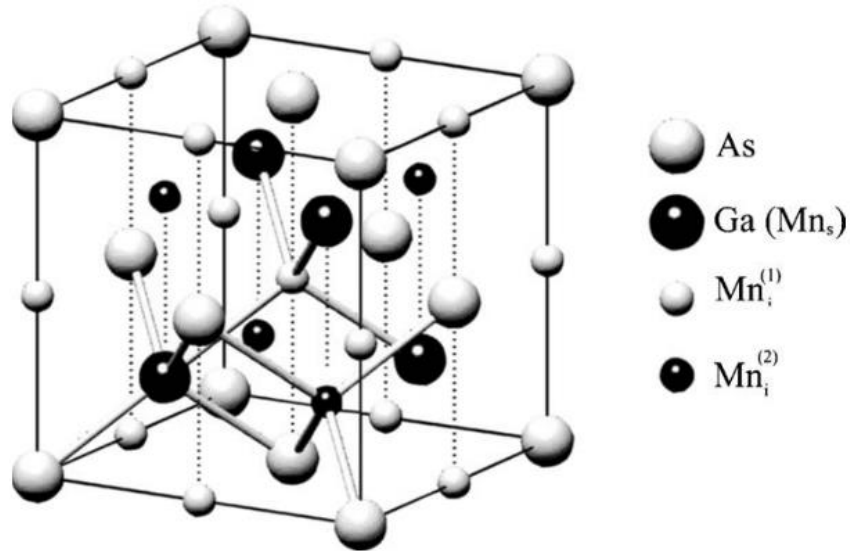
2.2.2. (III-V) Seyretilik Manyetik Yarıiletkenlerin Büyütülmesi

Ferromanyetizmanın (FM) keşfinden sonra, 1990'larda Mn katkılı III-V grubu yarıiletkenlerde, önce InMnAs [24-25] ve ardından GaMnAs'da [35] DMS için araştırmalar başlamıştır. (III,V) DMS'nin büyümesi, Munekata ve diğ. (1989) tarafından moleküler beam epitaksi (MBE) adı verilen bir teknik kullanılarak (In, Mn) As büyütülmesi ile başlatıldı. GaMnAs, MBE [36-38], sıvı faz epitaksi (LPE) [39] ve iyon implantasyonu [40, 29] dahil olmak üzere çeşitli teknikler kullanılarak büyütülebilir.

III-V grubu ferromanyetik yarıiletkenlerde, örneğin $Ga_{1-x}Mn_xAs$, II grubu manganez iyonları (Mn^{2+}) III grubu elementlerin yerine geçer ve alıcı (acceptor) olarak davranır ve manganez iyonları büyük bir manyetik momente sahip olduklarından lokalize spinler üretir [41].

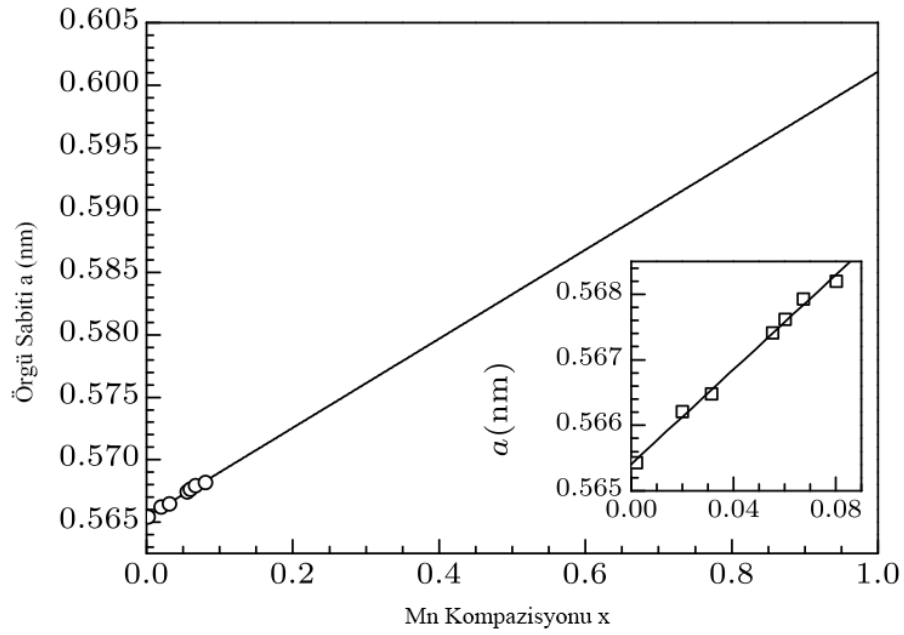
III-V yarıiletken örgüsünde Mn çözünürlüğü çok zayıf olduğundan dolayı termal denge koşullarında yüksek Mn konsantrasyonuna sahip GaMnAs elde edilmesi mümkün değildir. Bu yüzden denge dışı büyüme koşullarıyla çözünürlük limitini aşan LT-MBE (Düşük Sıcaklık) tekniği kullanıldı ve ilk olarak InMnAs alaşımını büyütülmesinde alttaş sıcaklığının (T_s) etkisi gözlemlendi [25]. Fakat InMnAs alaşımın esas olarak paramanyetik olduğu, ancak 10 K'nın altında ferromanyetik davranış gösterildiği gözlemlendi [25]. Daha sonra Ohno ve diğ. (1996) Mn'nın GaAs'a dahil edilmesinin daha yüksek bir T_C (~ 60 K) ile güçlü bir DMS malzeme ürettiğini gösterdi [42].

III-V grubu tabanlı ferromanyetik yarıiletkenlerin manyetik özellikleri, kristalin büyüme koşullarına büyük ölçüde bağlıdır. Yüksek kalitede filmler büyütme ve Mn içeriğini arttırmak için büyüme sıcaklığı önemlidir. Düşük sıcaklıkta, denge dışı büyüme, örgüde As yer değiştirme kusurları (antisitler) ve Mn araya yerleşme kusurları (interstisyeller) olan derin donörler oluşturur ve bunlarda $Ga_{1-x}Mn_xAs$ filmlerde boşluklar ile kompanse olarak malzemede kusurların oluşmasına yol açar ve lokalize ferromanyetizmayı güçlü bir şekilde bastırır [43].



Şekil 2.4: Mn atomlarının olası konumlarına sahip GaAs temel birim hücresi [45].

Ji Chang-Jian ve diğ. (2011) GaMnAs ince filmlerinin özelliklerinin büyüme koşulları tarafından ne ölçüde değiştirilebileceğini incelemiş ve deneysel sonuçları, daha düşük bir sıcaklıkta ($T_s = 200^\circ\text{C}$) büyüyen GaMnAs'daki kusurların esas olarak As_{Ga} olduğunu göstermektedir, ancak, $T_s > 230^\circ\text{C}$ ise, Mn_i baskın hale gelmektedir [44]. Poggio ve diğ. (2008) Mn konsantrasyonunun artmasıyla PL şiddetini bastırıldığını (azaldığını) gözlemiş ve buda Mn alaşımı ile kristal kusur yoğunluklarının arttığını gösterir [38]. Bu kusurlar manyetik tabakananın elektronik özelliklerini derinlemesine değiştirir.



Şekil 2.5: GaMnAs alaşımlarında örgü sabitinin Mn konsantrasyonu ile değişimi [44].

III-V grubu bileşiklerinin çoğunda örgü parametresinin a , Vegard kuralına uyduğu, yani kompazisyonuna göre doğrusal olarak değiştiği bilinmektedir [11]. Alaşım içerisindeki Mn miktarı, Mn atomlarının yer değiştirdiği Ga miktarına ve büyütme sıcaklığına bağlıdır. Fakat, yüksek Mn konsantrasyonuna sahip GaMnAs alaşım malzemesini büyütme, termal denge koşullarında Mn çözünürlüğü çok zayıf olduğundan dolayı mümkün değildir. Yüksek T_c (Ga, Mn)As alaşım için tipik olan yüzde birkaç ve üzeri konsantrasyonlarda, Mn atomların bir kısmı, araya yerleşme (interstisyel) pozisyonları, yani ikame olmayan bir örgü lokasyonunu işgal edecektir. Mn interstisyeller olan derin donörler oluşturur ve boşluklar ile kompanse olarak malzemede kusurların oluşmasına yol açar.

2.2.3. (Ga, Mn) As'in yapısal özellikleri

III-V seyreltik manyetik yarıiletken (Ga, Mn) As, iki ayrı yüzey merkezli kübik yapı olan çinko blend (Zn blend) yapısında kristalleşen bir DMS malzemesinin örneğidir. (Ga, Mn) As, $\text{III}_{1-x}\text{Mn}_x\text{V}$ grubu seyreltik manyetik yarıiletkenler (DMSs) arasında en çok deneysel olarak araştırılan malzemelerden biridir. (Ga, Mn) As alaşımlarının yapısı, biri As ve biri Ga olmak üzere iki ayrı yüzey merkezli kübik örgü (FCC) içeren ZnS yapısındadır. (Ga, Mn) As ideal olarak GaAs'den sadece, Mn atomlarının doğrudan Ga atomları (Mn_{Ga}) ile yer değiştirmesinden dolayı, tipik olarak seyreltik miktarı ile farklılık gösterir. Mn aşağıdaki elektron yapısına sahiptir $[Ar] 3d^5 4s^2$ ve galyum bölgesinde (Mn_{Ga}) 2^+ yük durumuna dahil edilmiştir. GaAs bir III-V yarıiletken olduğundan, Mn_{Ga} , bir boşluk ve bir lokalize manyetik moment ($S = 5/2$) sunan bir $3d^5$ değerlik elektron yapısına sahip olacaktır.

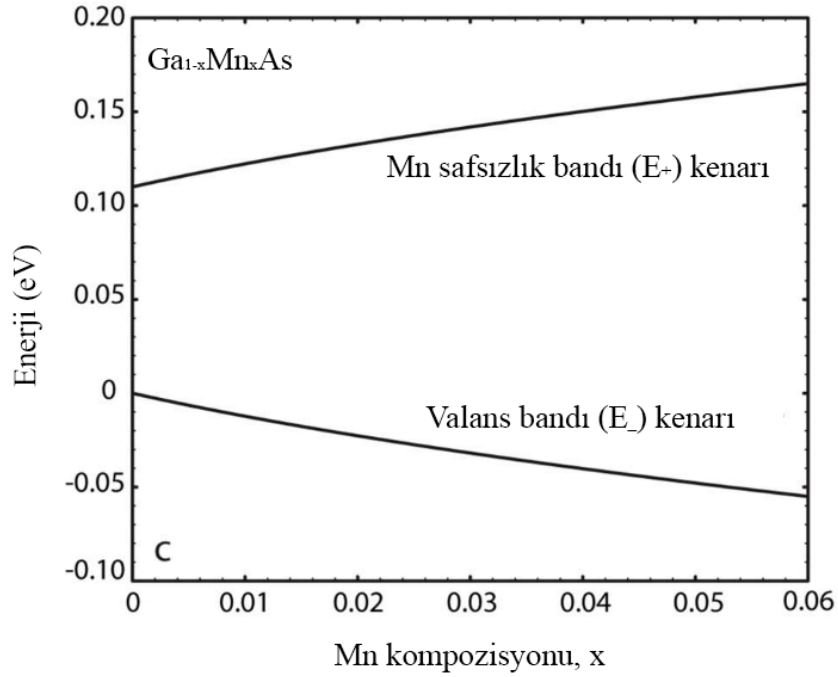
Prensip olarak, Mn atomları ferromanyetik (Ga,Mn)As yarıiletkeninde Mn_{Ga} pozisyonlarına dahil edilebilir ve Mn atomlarının bir kısmı, Şekil 2.4'de gösterildiği gibi en yakın komşusu ile çevrili olan dört Ga (Mn_i^1) veya dört As (Mn_i^2) ara bölgeleri de işgal edebilir [45]. GaMnAs alaşımlarında, Mn atomlarının büyük bir kısmı Ga bölgelerinde ikame ederek doğal bir manyetik moment oluşturur ve sistemde yarı dolu $3d$ kabuğu nedeniyle, boşluklar (holes) sağlayarak alıcılar (acceptors) olarak hareket eder [46].

2.2.4. (Ga, Mn) As'in elektronik bant yapısı

Ferromanyetik GaMnAs'ların keşfedilmesinden bu yana çok sayıda deneysel ve teorik çalışmalar yapılmıştır, fakat bu malzemelerin elektronik bant yapısı, boşlukların davranışı ve ferromanyetik düzenin mekanizması hala tam olarak anlaşılamamaktadır. Geçtiğimiz son on yılda, GaMnAs alaışımının ferromanyetizmasının doğası, bant yapısı [21, 47, 48] ve Fermi seviyesinin konumu [49-51] hakkında geniş çapta çalışmalar yapılmıştır.

GaAs'e, Mn'in dahil edilmesi evsahibi yarıiletkenin seviyeleriyle etkileşen Mn atomları, bant aralığı üzerinde değişimlerin yanında valans bandına yakın yerel seviyeler de yaratmaktadır. Yerel seviyelerin yoğunluğu Mn atomu yoğunluğuna bağlıdır. Yüksek katkı konsantrasyonu veya alaşımlama durumunda bantlaşmaya neden olabilmektedir. Bu durumda Mn atomlarının evsahibi yarıiletkenin bant yapısı üzerindeki etkisi, iki bant oluşumu şeklinde ortaya çıkmaktadır. Bu etkileşim farklı şekillerde modellenmekte ve açıklanmaktadır. Alberi ve diğ.

(2008), izole Mn atomlarının p durumlarının evsahibi yarıiletkenin genişletilmiş p durumları ile bant terslenmesi (anti-crossing) etkileşimine girdiğinde, alaşımın valans bandının E_+ ve E_- diye adlandırılan iki alt banda ayrılması şeklinde modellemiştir. Anti-crossing etkileşim sonucunda ise, bant aralığı içinde lokalize seviye oluşur yani, bir safsızlık bandı oluşur E_+ [50]. Safsızlık bandının enerjisi, Mn konsantrasyonu ile artarken, evsahibi malzemenin bant kenarı enerjisi azalmaktadır (Şekil 2.6).

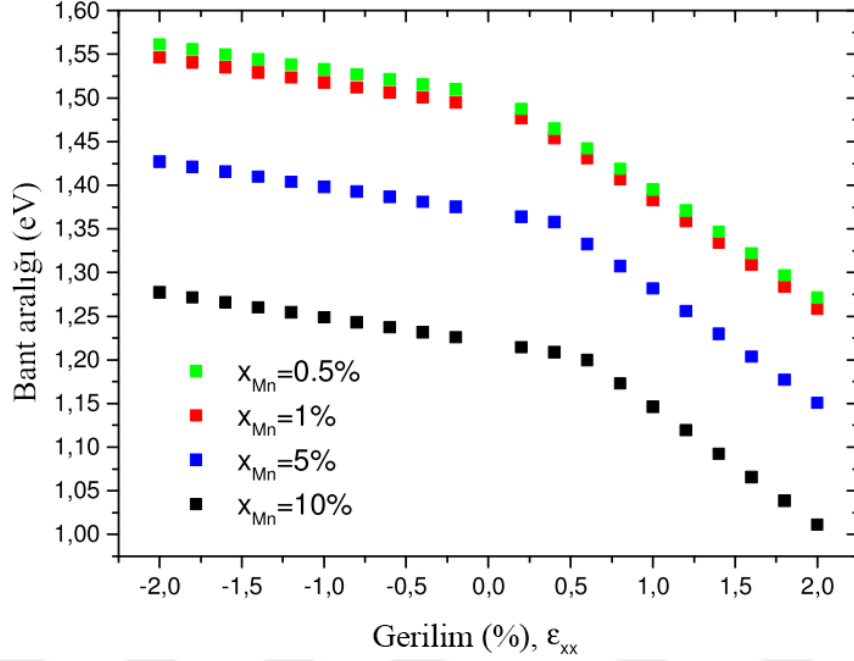


Şekil 2.6: $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ alaşımının valans ve safsızlık bant kenar enerjilerinin Mn kompozisyonunun fonksiyonu olarak kayması.

Yarıiletkenlerin optik özellikleri ve elektronik özellikleri son derece bant aralıklarına bağlıdır ve genellikle kristal yapılarıyla ilişkilendirilir. Tilouche ve diğ. (2017) tarafından yapılan araştırmada Mn kompozisyonundaki ve hem çekme (tensile) hem de sıkıştırma (compressive) gerilimindeki bir değişiklik, bant yapısının değişmesine neden olacağı bulunmuştur. Mn içeriğine ve uygulanan gerilime bağlı olarak bant aralığı incelendiğinde, gerilimin genişlemesi ve Mn kompozisyonunun artmasıyla bant aralığının azalması gözlemlenmiştir. Bant aralığının alaşım konsantrasyonuna ve sırasıyla çekme ve sıkıştırma gerilimlerine bağlılığı 0 K için aşağıda denklemlerde verilmiştir [21].

$$E_g(\text{çekme}) = 1.519 - 0.0299x_{Mn} - 0.02866\varepsilon_{xx} \quad (2.1)$$

$$E_g(\text{sıkıştırma}) = 1.519 - 0.0299x_{Mn} - 0.01275\varepsilon_{xx} \quad (2.2)$$



Şekil 2.7: Bant aralığının gerilimin ve Mn kompozisyonunun fonksiyonu olarak değişimi [21].

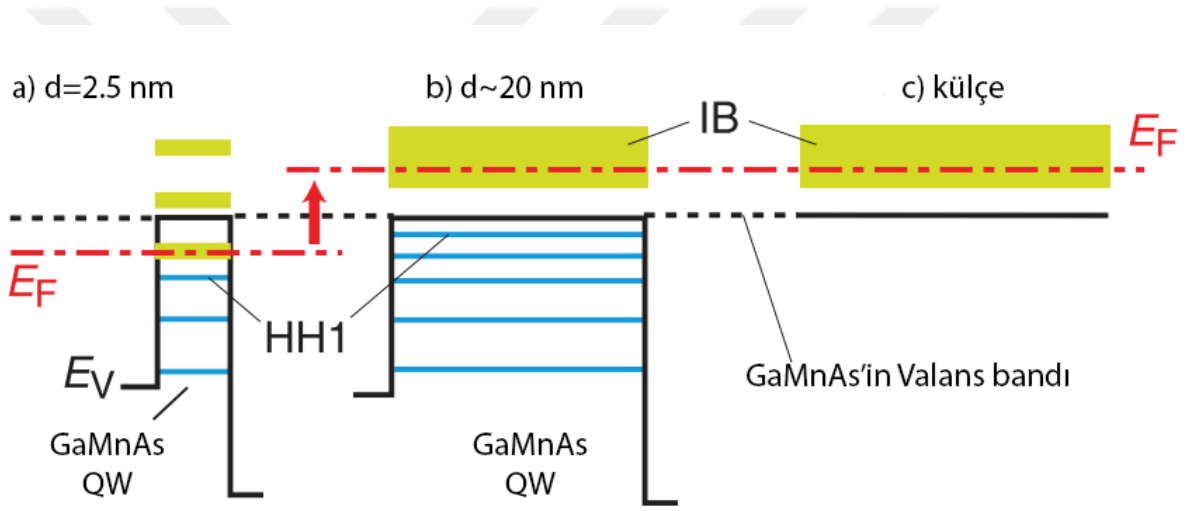
Pela ve diğ. (2012) düşük Mn kompozisyonuna sahip GaMnAs alaşımın temel ve spin bant aralığını GGA ve GGA-1/2 metodları ile hesaplamıştır. Kuramsal olarak hesaplanmış temel ve spin bant aralıkları, sıkıbağ yöntemi ve deneysel çalışma sonuçları ile uyumlu olduğu rapor edilmiştir. Bu kuramsal çalışmadan elde edilen sonuçlar derlenerek, bant aralıkları için analitik bir ifade türetilmiştir. Bu analitik ifadeler, GGA (spin) ve GGA-1/2 (temel bant) metodları için sırasıyla [47].

$$E_g = 0.49 - 3.0x + 6.7x^2 \quad (2.3)$$

$$E_g = 1.55 - 3.0x + 3.9x^2 \quad (2.4)$$

Denklemden, ilk terimler 0 K sıcaklığındaki GaAs'in bant aralığı enerji değerleridir ve x , Mn atomunun bağıl değeridir.

Bu çalışmalardan farklı olarak GaMnAs alaşımlarının Fermi seviyesi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır [49, 52, 53]. GaMnAs alaşımlarının optik [52] ve transport [54] özellikleriyle ilgili çalışmalarda, Fermi enerji seviyesinin GaMnAs alaşımlarının bant aralığı içinde safsızlık bandında (IB) bulunduğu gösterilmiştir. Okabayashi ve diğ. (2001) ARPES (Angle-resolved photoemission spectroscopy) yöntemi ile $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ alaşımlarının elektronik bant yapısını incelemiştir. GaAs'e Mn alaşımlanmasından dolayı valans bantlarından birinde kayma gözlenmiştir. GaAs ile kıyaslandığında $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ elektronik bant yapısında, Fermi seviyesinin, E_F yakınında safsızlık bant seviyelerinin olduğu gözlemlenmiştir [55].



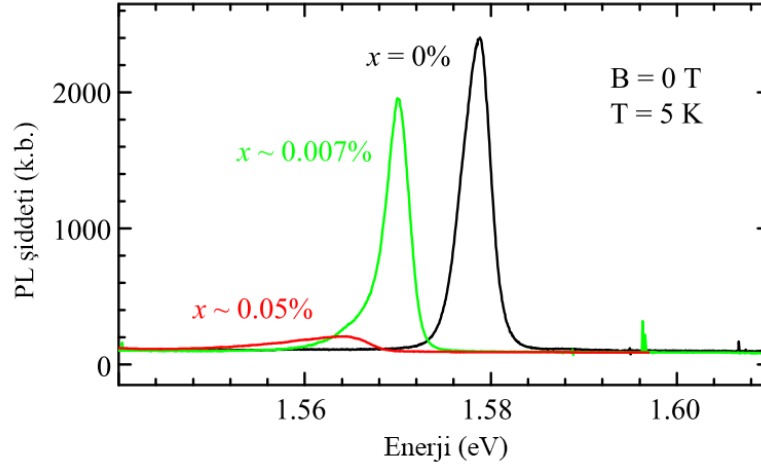
Şekil 2.8: Kuantum kuyu genişliğinin a) 2.5 nm b) 20 nm ve c) sonsuz kalınlıkta (külçe) olduğu GaMnAs alaşımlarının safsızlık bandının (yeşil bant) kuantizasyonunun şematik şekli [50].

2.2.5. $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ alaşımlarının optik özellikleri

III-Mn-V grubu Mn alaşımlı yarıiletkenlere ilişkili manyetik, elektriksel ve optik özellikler, taşıyıcı yoğunluklarının ve / veya spin polaritesinin bir fonksiyonu olarak hassas bir şekilde kontrol edilebilir. $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ alaşımlarında Mn'in dahil edilmesinden dolayı oluşan, özellikle fazla As ve Mn araya yerleşmelerin (interstisyellerin) (Mn_i), fotoluminesans ve absorpsiyon gibi hassas optik özelliklerin şiddetinde azlamaya neden olur. PL, kusurlar ve manyetik katkı hakkında önemli bilgiler ortaya çıkarabilir. Poggio ve diğ. (2008) tarafından yapılan fotoluminesans deney sonucunda Mn alaşım kompozisyonu arttıkça Şekil 2.9'da PL

spektrumunun kırmızıya kayması (red shift), enerji aralığının genişlemesi, şiddetinin azalması ve sonunda sönmesi gözlenmiştir.

Güneş ve diğ. (2015) tarafından moleküler beam epitaxy yöntemi ile (100), (110), (311)B ve (411)B doğrultularında GaAs yarı-yalıtkan alttaş üzerine büyütülmüş Mn'lı $\text{Ga}_{0.999}\text{Mn}_{0.001}\text{As}/\text{AlAs}$ kuantum kuyulu ve Mn alaşımsız GaAs/AlAs kuantum kuyulu yarıiletkenlerde sıcaklığa bağlı PL çalışmaları yapılmıştır. Deney sonuçlarında Mn alaşımsız örneklerle kıyaslandığında Mn alaşımlı malzemelerde PL şiddetinin azaldığı gözlenmiştir dahası, (100), (110) düzlemlerine kıyasla yüksek indisli düzlemlerde büyütülmüş Mn alaşımlı örneklerde PL şiddetinde azalma eğilimi daha fazla görülmektedir [46].



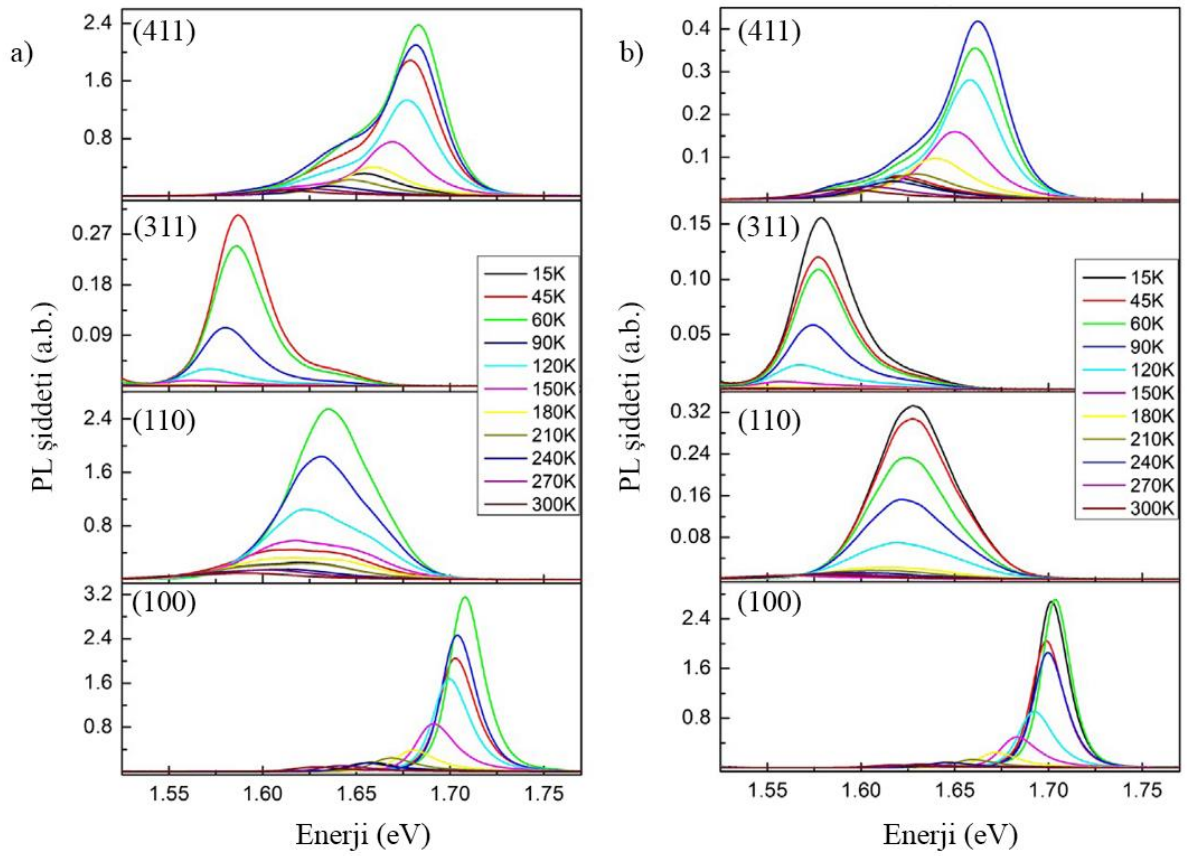
Şekil 2.9: Farklı Mn kompozisyonlarda PL şiddetinin, emisyon enerjisinin bir fonksiyonu olarak değişimi [38].

Bu çalışmalardan farklı olarak da Mn alaşımlı örneklerin sıcaklığa bağlı PL deney sonuçlarında, tuzak seviyelerini indükleyen Mn atomlarından kaynaklanan (GaMnAs'de lokalize seviyeler) tipik S şeklindeki (S-shape) değişim (kırmızıya kayma-maviye kayma-kırmızıya kayma) olduğunu bildirmişlerdir. S şekilli davranışın gözlenmeye başladığı sıcaklıklarda PL maksimumunun enerjisindeki kaymaya bağlı olarak lokalizasyon enerjileri bulma da yarı ampirik Varshni Denklemi kullanılarak belirlenir. Varshni modeli, düşük sıcaklıklarda ikinci dereceden asimptotik davranıştan (T^2) ve yüksek sıcaklıkta doğrusal davranıştan oluşur [56].

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{aT^2}{T+\beta^2} \quad (2.5)$$

Burada $E_g(0)$,0K'deki yarıiletkenin bant aralık enerjisi, a termal genleşme katsayısı ve β ise Debye sıcaklığıdır.

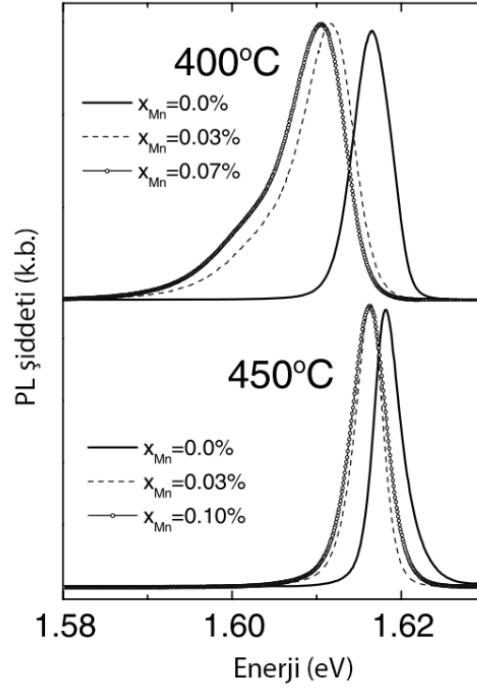
Şekil 2.10'da 15-300 K aralıklarında yapılan PL deney sonuçlarında S-şekli bir davranış göstermektedir.



Şekil 2.10: (100), (110), (311)B ve (411)B doğrultularında büyütülmüş a) GaAs/AlAs ve b) GaMnAs/AlAs (Mn=0.1%) için PL spektrumu. Grafikler [46] no'lu referanstan alınmıştır.

Rodrigues ve diğ. (2012) tarafından yapılan araştırmalarda yüksek alttaş sıcaklıklarında (400-450°C) büyütülen düşük Mn konsantrasyonlu ($x_{Mn} \leq 0.1\%$) GaMnAs/AlAs kuantum kuyularının (QWs) optik analizi yapılmıştır. Mn'in alaşımlanmasıyla, PL spektrumunda genişleme, optik verimliliğinde azalma ve PL pik noktasında kırmızıya kayma gözlenmiştir.

Ayrıca, eşit miktarda Mn alaşımlı örnekler için ana PL bandının kırmızıya kaymasının, 450 °C'de büyütülen örneklerle kıyasla daha düşük sıcaklıklarda (400 °C) büyütülen örneklerde daha büyük olduğu görülmektedir. Artan bir Mn alaşım miktarı ile ana kuantum kuyu (QW) PL tepe noktasında düşük enerjili bir omuz gözlenmiştir. Sığ bir donöre ait olan bu bandın araya yerleşmeden Mn_i (interstisyeller) kaynaklı olduğu teorik ve deneysel olarak gösterilmiştir [57].



Şekil 2.11: Farklı Mn konsantrasyonları ve büyütme sıcaklıklarına sahip 6 nm kuantum kuyulu malzemeler (QW) için normalize edilmiş PL spektrumları [58].

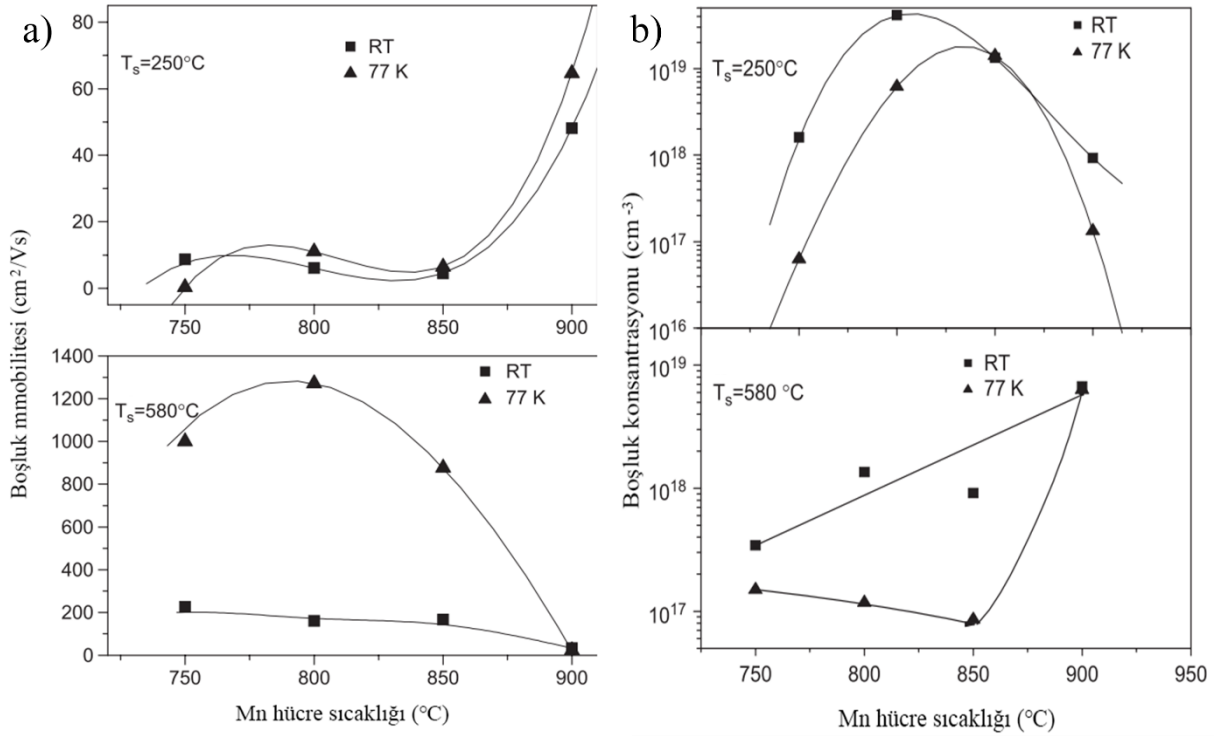
2.2.6. $Ga_{1-x}Mn_xAs$ alaışımının elektriksel özellikleri

Bir malzemenin elektronik transport özellikleri aygıt uygulamaları açısından önem taşıyan özelliklerden birisidir. DMS malzemelerin transport özellikleri, taşıyıcılar (boşluklar) ve lokalize momentler arasındaki değişim etkileşiminden etkilenir. Düşük miktarda Mn ($x < 0.03$) içeren $Ga_{1-x}Mn_xAs$ alaşımlarda yapılan transport ölçümlerinde bu malzemelerin yalıtkan davranış gösterdiği gözlenmiştir [59, 60].

Hwang ve diğ. (2005) DMS malzemelerin transport özelliklerinin yer değiştirme ve araya yerleşme (interstisyeller) Mn konsantrasyonlarına ve taşıyıcı ve kusur konsantrasyonlarına büyük ölçüde bağlı olduğunu göstermiştir. Alberi ve diğ. (2008) $Ga_{1-x}Mn_xAs$ alaşımlı ve

manyetik olmayan hidrojenik akseptör katkılı GaAs arasındaki boşlukların transport özelliklerindeki farkı açığa kavuşturmak için, boşlukların mobilitelerini ölçmüştür. Oda sıcaklığında yapılan deney sonuçlarında $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ ($\mu \sim 1 - 5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) boşluk mobilitelerinin aynı oranda manyetik olmayan akseptör ile katkılı olan GaAs'den ($\mu \sim 10 - 50 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) bir mertebe düşük olduğu bulunmuştur ve boşlukların mobilitesindeki bu büyük eşitsizlik boşlukların etkin kütle farkından dolayıdır. [54].

Xu ve diğ. (2007) farklı alttaş sıcaklıklarında büyütülmüş Mn alaşımlı GaMnAs alaşımının sıcaklığa bağlı boşluk mobilitesi ve boşluk konsantrasyonu incelemiştir. Şekil 2.12 (b)'de gösterildiği gibi düşük alttaş sıcaklıklarında büyütülen örneklerde Mn hücre sıcaklığının



Şekil 2.12: Mn hücre sıcaklığının bir fonksiyonu olarak farklı alttaş sıcaklıklarda büyütülmüş Mn alaşımlı GaMnAs alaşımlarda a) boşluk mobilitesi ve b) boşluk taşıyıcı yoğunluğu [31].

artması ile boşluk konsantrasyonunun artması ve oda sıcaklığında ve 77 K'de sırasıyla 800 ve 850 $^{\circ}\text{C}$ 'de maksimum değere (10^{19} cm^{-3}) ulaşarak tekrar azaldığı gözlenmiştir. Yüksek alttaş sıcaklıklarında ise, boşluk yoğunluğunun çoğunlukla Mn hücre sıcaklığı ile arttığı gözlenmiştir. Boşluk konsantrasyonunun yüksek Mn hücre sıcaklıklarında azalması Mn konsantrasyonunun GaAs'da katı çözünürlük sınırını aşmaya başlamasından kaynaklıdır [31]. Katı çözünürlük

limitinin üzerine daha fazla Mn eklendiğinde, Mn bakımından zengin çökeltiler ve Mn_i araya yerleşme (interstisyeller) gibi bazı kusurlar oluşmaktadır ve bu kusurlar, yük kompanse faktörleri nedeniyle boşluk konsantrasyonunda bir azalmaya neden olabilir [31].

Düşük alıtış sıcaklığında, oda sıcaklığında ve 77 K'de yapılan mobilite ölçümlerinde boşluk mobilitelerinin düşük değerde olduğu ve Mn hücre sıcaklığı ile çok fazla değişmediği Şekil 2.12 (a)'da gösterilmektedir. Ancak, diğer Mn hücre sıcaklıklarına kıyasla 900 °C'lik bir Mn hücre sıcaklığında boşluk mobilitesi artmıştır. Yüksek alıtış sıcaklıklarında, oda sıcaklığındaki ölçümlerde boşluk mobilitesi Mn hücre sıcaklığı ile değişmemektedir. 77 K'de ise boşluk mobilitesi çok daha yüksektir ve Mn hücre sıcaklığı arttıkça düşer. Düşük alıtış sıcaklığındaki mobilite sayıları, ince filmlerin zayıf kristal kalitesinin bir yansımasıdır [31].

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde tez çalışması kapsamında incelenen Mn'sız ve Mn'lı örneklerin yapıları, fabrikasyon aşamaları ve optik ölçümlerin analizi için kullanılan ölçüm tekniklerinden bahsedilecektir.

3.1. ÖRNEKLERİN YAPISI

Bu tez çalışmasında, optik özelliklerin kristal doğrultularına bağlı olarak değişimin belirlenmesi için, moleküler beam epitaxy yöntemi ile (100), (110), (311)B ve (411)B doğrultularında GaAs yarı-yalıtkan alttaşı üzerine büyütülmüş Mn'lı $\text{Ga}_{0.999}\text{Mn}_{0.001}\text{As/AlAs}$ kuantum kuyulu ve Mn'sız GaAs/AlAs kuantum kuyulu yarıiletkenler incelenmiştir.

GaMnAs malzemelerde Mn atomları, Ga bölgelerinde Mn^{++} iyonu olarak bu malzemeye dahil edilir, böylece bir kısmı alıcılar (akseptör) olarak davranır ve Mn^{++} iyonunda lokalize olan manyetik momentler arasında ferromanyetik kuplaja aracılık eden boşluklar sağlar.

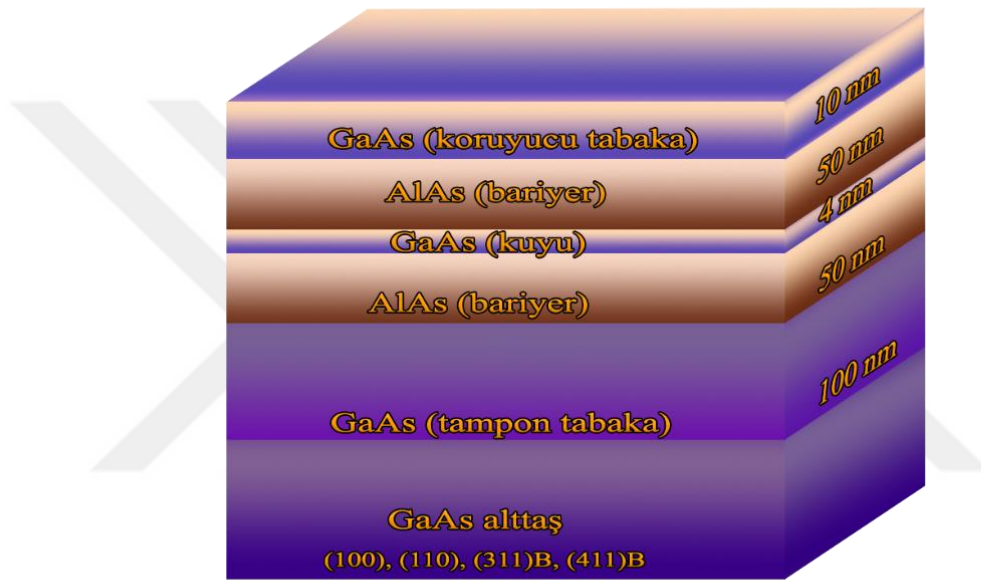
GaAs, birbirine geçmiş iki yüzey merkezli kübik örgü ile kübik çinko blend yapısına sahiptir. Kübün içinde 4 tane GaAs “molekülü” vardır. Her bir Ga atomu tetrehedral yapıda As atomuna bağlanır. Bu, Ga atomlarının üst katmanında olduğu (111)A düzleminin ve As atom olduğu (111)B düzleminin kimyasal olarak eşit olmayan (111) düzlemlerine yol açar. Genel olarak, (111)A yüzü olarak da adlandırılan (111) Ga yüzü, aşağıdaki yüzeylerden 2-5 kat daha yavaş aşınır: (100), (110) veya (111) As, aynı zamanda (111)B' de denir [61].

3.1.1. GaAs/AlAs Kuantum Kuyulu Örnekler

Tez kapsamında GaAs yarı yalıtkan alttaşı üzerinde (100), (110), (311)B ve (411)B doğrultularında büyütülmüş Mn'sız GaAs/AlAs kuantum kuyulu yapıların optik özellikleri incelenmiştir. Örneklerin tamamı büyüme sırasında alttaşı sıcaklığının doğru izlenmesini sağlayan gerçek zamanlı bir tabaka (wafer) sıcaklık sensörü ile donatılmıştır Veeco Modular Gen II moleküler ışın epitaksi reaktörü ile büyütülmüştür. Büyütme işlemi 450 °C'de tampon bölgesi ile başlanmış ve diğer üst katmanlar da aynı sıcaklıkta büyütülmüştür.

Yarı-yalıtkan yarıiletkenler yüksek direnç değerlerine, yüksek kusur yoğunluklarına ve kısa taşıyıcı ömürlerine sahip olduklarından dolayı entegre devrelerde yalıtım izolasyonu ya da

transportu engelleyen tabaka olarak kullanılır. Bu yüzden örnekler, elektriksel özelliklerine etki etmemesi için yüksek dirençli yarı-yalıtkan (Semi-insulating, SI) GaAs alttaş üzerinde farklı doğrultularda büyütülmüştür. Mn'sız ($x = 0$) örneklerde, 4 nm kalınlığına sahip GaAs kuantum kuyusu 50 nm kalınlığına sahip AlAs bariyer tabakası ile çevrelenmiştir. Yapı 10 nm kalınlığına sahip GaAs koruyucu tabaka ile kapatılmıştır. GaAs/AlAs kuantum kuyulu örneğin yapısı ve tabaka kalınlıkları Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1: Mn'sız GaAs/AlAs kuantum kuyulu örneklerin yapısı.

(100), (110), (311)B ve (411)B yönelimlerinde büyütülmüş Mn'sız ($x = 0$) örnekler sırasıyla As100, As110, As311 ve As411 olarak kodlanmıştır.

3.1.2. $\text{Ga}_{0.999}\text{Mn}_{0.001}\text{As}$ Kuantum Kuyulu Örnekler

Tez kapsamında incelenen Mn'lı ($x = \%0.1$) $\text{Ga}_{0.999}\text{Mn}_{0.001}\text{As}/\text{AlAs}$ kuantum kuyulu örnekler benzer şekilde MBE yöntemiyle GaAs yarı-yalıtkan alttaş üzerinde (100), (110), (311)B ve (411)B yönelimlerinde ve 450 °C'de büyütülmüştür. Mn alaşımlı ($x = \%0.1$) $\text{Ga}_{0.999}\text{Mn}_{0.001}\text{As}$ kuantum kuyusu 50 nm kalınlığına sahip AlAs bariyer tabakası ile çevrelenmiştir. Toplam kuantum kuyu kalınlığı 4 nm kalınlığında olup, AlAs arayüzelerine

bitişik 1 nm kalınlığına sahip iki tane GaAs tabakadan ve 2 nm kalınlığına sahip GaMnAs tabakadan oluşmaktadır. Yapı 10 nm kalınlığına sahip GaAs koruyucu tabaka ile kapatılmıştır. $\text{Ga}_{0.999}\text{Mn}_{0.001}\text{As}/\text{AlAs}$ kuantum kuyulu örneğin yapısı ve tabaka kalınlıkları Şekil 3.2’de verilmiştir. (100), (110), (311)B ve (411)B yönelimlerinde büyütülmüş Mn alaşımlı ($x = 0.1\%$) örnekler sırasıyla Mn100, Mn110, Mn311 ve Mn411 olarak kodlanmıştır.



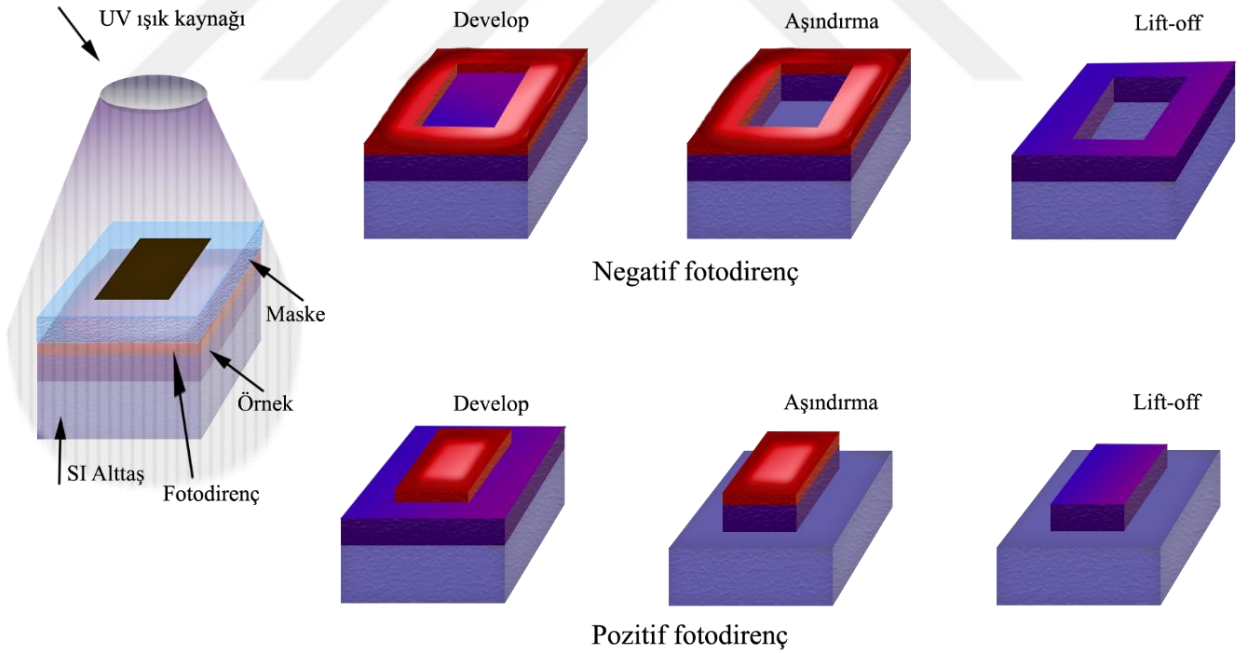
Şekil 3.2: Mn alaşımlı $\text{Ga}_{0.999}\text{Mn}_{0.001}\text{As}/\text{AlAs}$ kuantum kuyulu örneklerin yapısı.

3.2. ÖRNEK FABRİKASYONU

Örnekler üzerinden elektriksel ölçüm yapabilmek için elektriksel kontaklara ihtiyaç vardır. Bu tez çalışmasında elektriksel kontakların elde edilmesi için fotolitografi tekniği kullanılmıştır. Bu nedenle, elektriksel kontakların elde edilmesinde kullanılan fotolitografi yöntemi hakkında bilgi verilecektir.

Fotolitografi, yarıiletken endüstrisinde mikrofabrikasyon süreçlerinde en önemli ve en pratik yöntemlerinden biridir ve malzemede detaylı desenler oluşturmak için kullanılır. Temel olarak,

ultraviyole (UV) ışığa duyarlı fotodirencin (fotorezistin) örnek yüzeyine kaplanması ve daha sonra belli bir geometrik desene sahip maskenin UV ışın aracılığıyla örnek yüzeyine desenin işlenmesidir. Pozitif ve negatif olarak bilinen iki tip fotodirenc vardır (Şekil 3.3). Yüzeyi pozitif fotodirenc kaplı malzeme UV ışığa maruz kaldığında, rezistin kimyasal yapısı değişir ve fotodirenc developerında çözünür hale gelir. UV ışığa maruz kalmayan bölgeler ise fotodirenc developerında çözülmez. Negatif fotodirencde ise UV ışığa maruz kalan bölge fotodirencin kimyasal yapısının polimerize olmasına neden olur; buda negatif fotodirencin çözülmesini son derece zor hale getirir. Pozitif fotodirencin aksine negatif fotodirencde UV ışına maruz kalmayan bölge kolayca çözünür hale gelir. Kullanılan maskeler mikro elektronik teknolojisi için ve fabrikasyonu yapılacak aygıtların şekline göre özel olarak tasarlanan ve geliştirilen kuartz üzerine krom kaplanarak yapılmış maskelerdir. Krom ile kaplı kısımlar UV ışının örnek üzerine düşmemesi için karartıcı bir bölge oluşturur ve örnek yüzeyinde pozitif fotodirenc varken UV ışık düşürdüğümüzde krom kaplı bölgelerdeki rezist fotodirenc developerında çözünmeyeceğinden dolayı istediğimiz deseni elde etmiş oluruz.



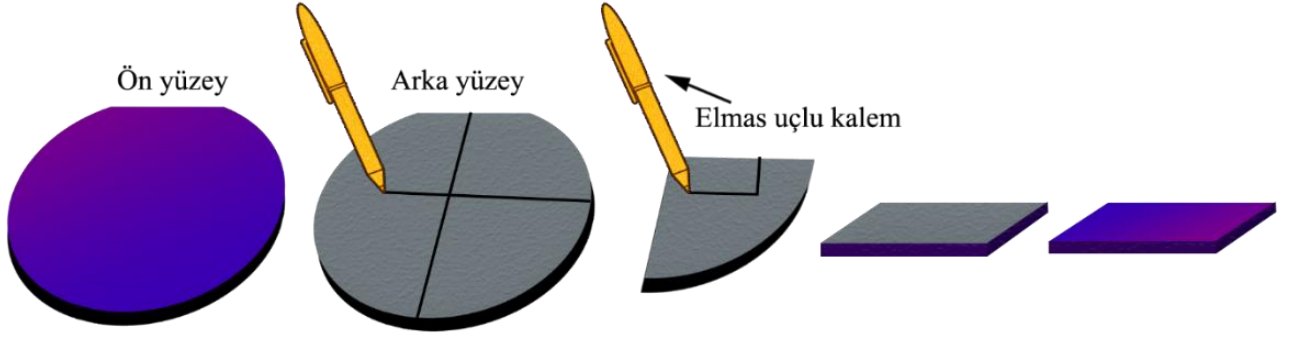
Şekil 3.3: Pozitif ve negatif fotodirenclerin farkı.

Mikroelektroniklerin fabrikasyonu için kullanılan oldukça gelişmiş ve pratik bir teknik olan fotolitografi, toz partiküllerinin ve diğer kirletici maddelerin çok aza indirildiği; temiz oda koşullarına gereksinim duymaktadır. Çünkü atmosferde gözle görülemeyen mikron boyutlarında oldukça fazla parçacık bulunduğundan, mikron veya mikron-altı boyutlarda şekillendirilmesi yapılacak aygıtlar üzerinde fabrikasyon süreçlerinde yarıiletken levhalara ve litografik maskelere yerleşerek veya daha sonra bu parçacıkların yer alması aygıtların elektriksel ve optiksel özelliklerini olumsuz etkileyerek cihazlarda devre arızasına neden olmaktadır.

Tez kapsamında incelenen GaAs/AlAs ve GaMnAs/AlAs kuantum kuyulu örneklerin fabrikasyon çalışmaları İstanbul Üniversitesi Fizik Bölümü Nano ve Optoelektronik Araştırma Laboratuvarları bünyesinde bulunan İleri Litografik Yöntemler Laboratuvarı'nda gerçekleştirildi. İleri Litografik Yöntemler Laboratuvarı bünyesinde kurulan temiz oda, içerisinde ft^3 hacim başına $0.5 \mu m$ boyutunda olan partikül sayısı 10, 100 ve 1000 sınıfı olan üç bölümden oluşmaktadır. Fabrikasyon sırasında, kristal yongaların temizliği, fotorezist kaplaması ve kimyasal aşındırmaları 10 sınıfı, UV uygulama işlemi 100 sınıfı ve metalizasyon işlemleri 1000 sınıfı bölümlerde gerçekleştirilmiştir. Fotodirencin yapısı sarı ışıktan etkilenmediği için fotolitografinin metalizasyon aşamasına kadar olan süreçleri 'sarı oda' olarak adlandırılan 100 sınıfı laboratuvarda gerçekleştirildi. Bu bölümde yarıiletken aygıtların fabrikasyon süreçleri hakkında kısaca bilgi verilecektir. Fabrikasyon süreçleri ile ilgili ayrıntılı bilgi Referans [62]'den edinilebilir.

3.2.1. Kristal Kesme

Farklı boyutlarda epitaksiyel olarak büyütülen kristal yongalardan küçük boyutta (nm, μm , mm) aygıtlar yapabilmek için kristal yongaların kesilmesi gerekmektedir. Fabrikasyon süreçlerinde kristal yongaların kesilmesi, nihai ürünün kalitesinde kritik bir rol oynar. Belirli büyütme doğrultularına sahip kristal yongaları elmas uçlu kalem ve elmas bıçak testere ile mekanik ve manuel olarak çizmek ve kesmek en yaygın olan metodlardan biridir. Lazer teknolojisindeki yenilikler sayesinde, geleneksel düz çizgiden ziyade, eğriler, daireler ve diğer düz olmayan profiller oluşturulmaktadır ve kristal yonganın merkezinden çevresine herhangi bir hasar vermeden küçük boyutta kristal yongaların kesilmesi mümkündür. Seramik, elmas ve diğer sert malzemeler için lazer ile kesme tekniği uygulanabilir.



Şekil 3.4: Örneğin elmas uçlu kalem ile uygun bir şekilde istenilen boyutlarda kesilmesi.

Bu çalışmada örnekler Şekil 3.4’de gösterildiği gibi manuel olarak elmas uçlu kalem yardımıyla kesilmiştir. Manuel kesme işlemi örneğin arka yüzeyinden kesim yapılacak doğrultu boyunca elmas uçlu kalem yardımıyla boydan boya bir çizik atılır. Çizik işleminin ardından örneğin ön yüzü çevrilerek temiz ve yumuşak bir bez üzerinden, çizik atılan doğrultu boyunca örneğin üzerine hafif bir şekilde kuvvet uygulanır. Bu şekilde kristal kesme doğrultusu boyunca kesilmiş olur.

3.2.2. Kimyasal Temizleme İşlemi

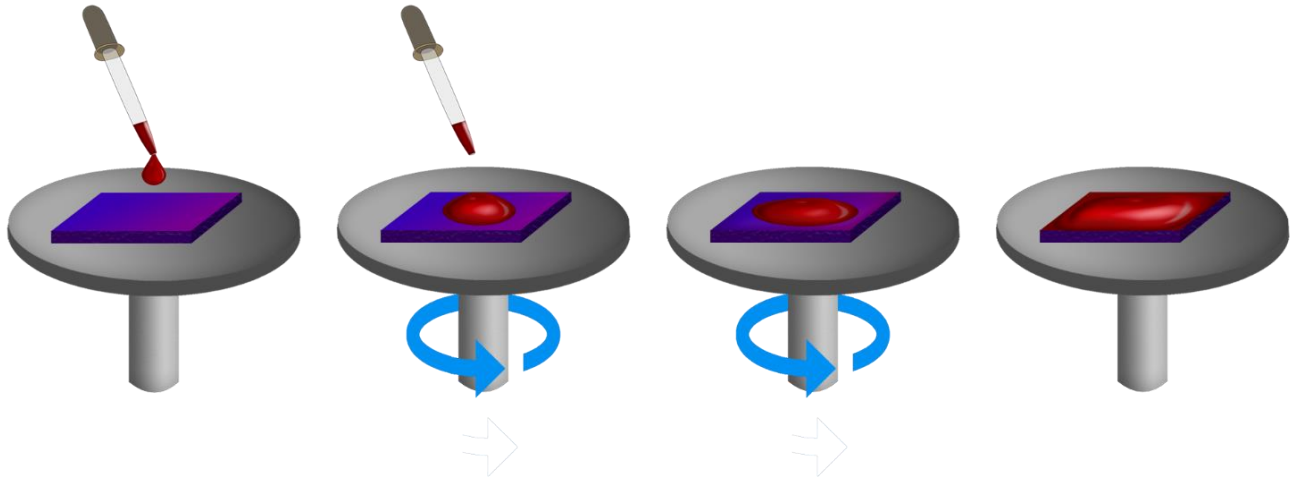
Bir kristal yonganın fabrikasyon sürecine başlamadan önce kabul edilebilir ürün verimleri elde etmek için, örnek yüzeylerine yapışmış partiküller, organik ve inorganik safsızlıklar ve kusurlar temizlenmelidir. Kirliliklerin önlenmesi, yarıiletkenlerin fabrikasyon süreçlerinde son derece önemlidir ve örnekler, işlem sırasında birçok temizleme işleminden geçecektir.

GaAs ve diğer yarıiletkenlerin yüzey temizliği iki farklı yöntem içerir. Birincisi, organik bileşikler ve metal iyonları gibi kirletici maddelerin temizlenmesidir. İkincisi, metal kontak alma gibi sonraki işlemler için temiz yarıiletken yüzeyi elde etmek için doğal oksidin çıkarılmasıdır [61].

Bu çalışmada incelenen örnekler yeni büyütülen kristal yongalar olduğu için organik çözelti temizleme prosedürü kullanılmıştır. Örnekler ilk önce kristal kesme aşamasında oluşan gözle görünür toz ve kirliliklerden arındırmak için bol deiyonize (DI) su ile yıkandı. Daha sonra örnekler zorlu kirliliklerin temizlenmesi için sırasıyla birer dakika, asetonun ve izopropil alkolün kaynama noktasına yakın sıcaklıklarda bekletilerek ardından bol deiyonize (DI) su ile yıkandı. Bir önceki kimyasal kalıntılardan arınması için her bir yıkama süreci arasında örnek DI su ile yıkandı. Temizlenen örnekler saf azot gazı ile kurutularak daha sonra yüzeyde oluşan su moleküllerinin buharlaşması için örnekler yaklaşık 1 dk boyunca 110 °C’ de ısıtıcı üzerinde ısıtılarak nemi atıldı. Temizlik sürecinden sonra optik mikroskop altında yüzeylerin temiz olup olmadıkları kontrol edildi, örnekler yeteri kadar temiz olmadığı durumlarda organik temizleme prosedürü tekrarlandı.

3.2.3. Fotodirenç Kaplanması

Farklı uygulamalar için bandırarak kaplama, püskürterek kaplama ve spin kaplama gibi birçok fotodirenç kaplama yöntemleri mevcuttur. Bu çalışmada standart düz kristal yongalar için kullanılan en yaygın metodlardan biri olan spin kaplama tekniği kullanıldı.



Şekil 3.5: Döndürerek fotodirenç kaplama yönteminin adımları.

Fotodirenç kaplamak için dönme hızı kontrol edilebilen bir tabla (spin coater) kullanıldı. Döndürme sırasında, kristal yonganın merkezkaç kuvveti nedeniyle, örnek yüzeyine birkaç *ml* damlatılan fotodirenç üniform olarak belirlediğimiz dakika başına dönme sayesinde (rpm)

istenilen kalınlıkta dağılır. Bu işlem sırasında örneğin dönerek savrulmaması için tablanın örnek yerleştirilecek olan orta kısmı ince bir kanal ile vakum sistemine bağlıdır.

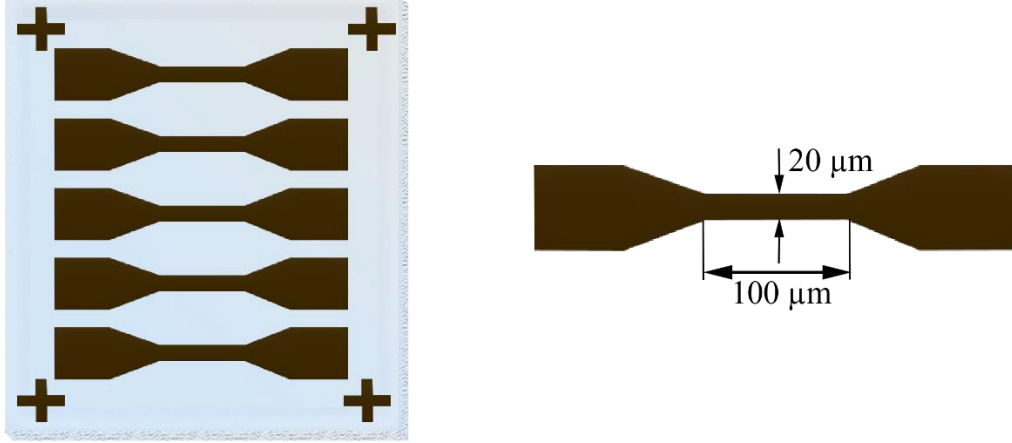
Temizlenen örnekler Şekil 3.5’da olduğu gibi döndürerek kaplama yöntemi (spin coating) ile pozitif (AZ5214E) fotodirenç kullanılarak kaplandı. İstenilen kalınlığa ulaşılması için kaplama sistemi (spin coater) programlandı.

Yaklaşık 1.5 μm kalınlık elde etmek ve üniform olarak kaplamak için dönme hızı ilk olarak 5 s 500 rpm, 30 s 7000 rpm ve daha sonra 6000 rpm’e ulaştıktan sonra dönme süresi 60 s olacak şekilde ayarlandı. Yüzeyi kaplanmış örnek, fotodirenç çözültisi içinde bulunan çözücü konsantrasyonunun buharlaşması, fotodirencin örnek yüzeyine daha iyi yapışması, desen oluşturmak için kullanacağımız maskeye yapışmaması ve maskenin kirlenmemesi ve sonraki ısıtılarda (kaplama, aşındırma) kabarcık oluşumunu önlemek için örnek 90 °C’de 30 saniye kadar ısıtıldı.

3.2.4. Pozlama

Fotodirenç kaplanan ve kurutulan örnek maske hizalayıcıya (SUSS MicroTec MJB4 type:191247) yerleştirildi. İstenilen modelde opak (krom kaplı) ve saydam bölgelerden oluşan bir fotomask desenin örnek yüzeyine aktarmak için maske kristal yonga boyutlarına göre hizalanır. Düzgün hizalama sağlandıktan sonra, örnek fotomaskeyle doğrudan temas ettirilmesi için maske hizalayıcının Soft Contact modu kullanıldı. Hard contact modunda örnek maske ile doğrudan temas eder. Bu modda 1 μm aralığında bir çözünürlük mümkün iken Soft Contact modunda 2 μm çözünürlüğe ulaşılabilir. Maske ile örnek aralığı ne kadar düşükse, çözünürlük o kadar yüksek olur. Kırılgan örneklerde örneğe zarar vermemek için Soft Contact modu tercih edilebilir.

Maske hizalayıcının Soft Contact modunda cam üzerine UV ışını geçirmeyecek kısımları krom kaplanarak elde edilen maske Şekil 3.6’da verilmiştir. Yüksek çözünürlük elde etmek için maske örnek üzerine dokundurulacak kadar yaklaştırılır. Küçük boyuttaki şekillerde kırınım desenleri oluşmaması ve daha keskin şekiller elde etmek için örnek ile maske arasında boşluk kalmamasına dikkat edilmelidir.



Şekil 3.6: Şerit kontak (simple bar) şeklinde oluşturulmuş maske. Gri kısımlar krom olup kuartz üzerine kaplanmıştır.

Fabrikasyon süreçlerinde örnekleri 45 – 55 s UV ışığa maruz bırakıldığında ve ardından fotodirenci kaldırmak için aseton içerisinde bırakıldığı zaman örnek yüzeyinde hala maske deseninin olduğu gözlemlenmiştir. Litografi esnasında örnekleri 35 s UV ışığa maruz bırakmanın ideal olduğu belirlenmiştir. Maske hizalayıcının UV ışık kaynağı (HBO 350) 365 nm (g-line)'de kullanılmıştır.

Pozlama işlemi sonrasında örnek kullandığımız fotodirence uygun çözelti (AZ400K developer: DI su, 1:3) içerisinde bekletilir. Pozitif fotodirenç UV ışığa maruz kaldığında kimyasal yapısı değişerek bağlarında zayıflamalar olur. Bu sayede hazırladığımız fotodirenç çözeltisinde örneklerin UV ışığa maruz kalmış bölgeleri çözünürken UV ışığa maruz kalmayan bölgeler ise çözünmeden kalır. Örnekler 1:3 developer-DI çözeltisi içerisinde 25-30 s bekletilmelidir. Örnek üzerinde kullandığımız maske desenin özdeş bir kopyasının net oluşup oluşmadığını optik mikroskop ile incelenmelidir ve istenilen şekil olmamış ise bir süre daha 1:3 developer-DI çözeltisi içerisinde bekletilmelidir. Daha sonra çözeltiden çıkarılan örnekler bol DI su ile temizleyip azot gazı ile kurutulmuştur.

3.2.5. Islak Aşındırma İşlemi

Birkaç inç çapında ve genelde bir kaç 100 μm kalınlığında büyütülen kristal yongadan birkaç mikrometre (μm) veya nanometre (nm) boyutunda örnekler oluşturmak istendiginde yongaların belirli bölgelerinin aşındırılması gerekmektedir. Aşındırma, örnek üzerinde kullandığımız

maske desenin özdeş bir kopyasının net bir şekilde elde ettikten sonra fotodirenç tarafından korunmayan bölgelerin kaldırılması işlemidir. Aşındırma işleminin gerçekleştiği hız, aşındırma hızı olarak bilinir ve her yönde aynı hızda ilerlerse, aşındırma işleminin izotropik eğer yalnızca bir yönde ilerlerse anizotropik denir. Islak aşındırma ve Kuru aşındırma olarak bilinen iki kristal aşındırma yöntemi vardır. Cihaz yapılarını ıslak aşındırma işlemlerini veya kuru aşındırma işlemlerini kullanarak aşındırmak mümkündür. Her iki yaklaşımın da uygulamanın özelliklerine bağlı olarak avantajları ve dezavantajları vardır.

Islak aşındırmanın en önemli özelliği, yüzeyde neredeyse hiç elektronik hasar vermemeleridir. Yüzey elektronik özellikleri önemli olduğu uygulamalarda, genellikle iyon bombardımanı ile yüzey elektronik özelliklerini bozan kuru aşındırma işleminden ziyade ıslak aşındırma işlemi açıkça tercih edilir. Islak aşındırmanın bir başka avantajı, kullanım kolaylığıdır. Kuru aşındırma işlemleri, gaz kullanımı ve vakum sistemleri ve düşük sıcaklıkta plazma deşarjı oluşturmak için genellikle karmaşık elektronik aygıt gerektirse de, ıslak aşındırma bir tezgah üzerinde basit cam eşyalar içinde gerçekleştirilebilir. Bununla birlikte, ıslak aşındırma işlemlerinde karşılaşılan bazı sınırlamalar vardır. Kuru aşındırma işlemleri mükemmel profil kontrolü sağlarken ıslak aşındırılmış bir özelliğin profilini kontrol etmek çok daha zordur. Islak aşındırma oranları, değişen sıcaklığa ve çözeltinin ne kadar sıklıkla karıştırıldığına göre genellikle önemli ölçüde değişir [61].

Kimyasal aşındırma işleminde istenilen aşındırma hızlarına bağlı olarak H_2SO_4 , H_2O_2 ve H_2O farklı oranlarda alınarak çözeltiler oluşturulur. GaAs için bazı aşındırıcı karışımların oranları ve aşındırma hızları da verilmiştir. Islak aşındırma işlemi uygulanacak örneklerin alttaş tabakasına kadar aşındırmak hedeflenmektedir. Örneklerin yapısı 10 nm koruyucu tabaka, iki tane 50 nm kalınlığında olan bariyer tabaka, 4 nm kuyu tabaka ve 100 nm tampon tabakadan oluştuğundan aşındırılacak kalınlığın 214 nm olması hedeflenmiştir.

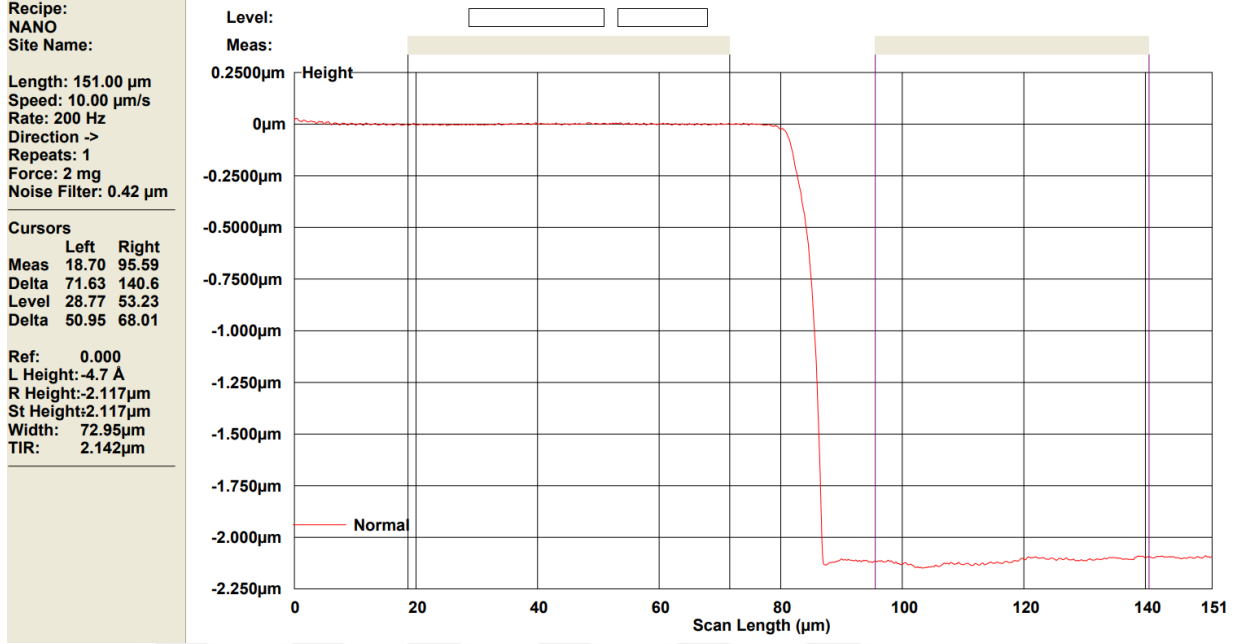
Bu çalışmada kuantum kuyulu örnekleri aşındırmak için 1:8:160 oranında hazırlanmış H_2SO_4 - H_2O_2 - H_2O çözeltisi kullanıldı. Bu çözeltiyi hazırlamak için ilk olarak ölçekli cam behere sırası ile 1 oranda H_2SO_4 (Sülfirik asit), ardından üzerine 8 oranında H_2O_2 (Hidrojen peroksit) eklendi ve karıştırıldı. Daha sonra hazırladığımız çözelti içerisine 160 oranında hazırlanan DI su yavaş bir şekilde dökülerek karıştırıldı.

Tablo 3.1: GaAs için aşındırıcıların karışım ve aşındırma oranları [63].

Asit	Karışım oranı*	Konsantrasyon (mol/l)		Relatif anizotropi	Aşındırma hızı (100) ($\mu\text{m/d}$)
		Asit	H ₂ O ₂		
H ₂ SO ₄	1:8:1	1.8	8.0	1.0	14.6
H ₂ SO ₄	1:1:8	1.8	1.0	0.61	1.3
H ₂ SO ₄	8:1:1	14.0	1.0	0.35	1.2
H ₂ SO ₄	1:8:80	0.20	0.90	0.32	0.54
H ₂ SO ₄	1:8:160	0.10	0.47	0.27	0.26
HCl	1:1:9	1.1	0.89	0.69	0.20
HCl	1:4:40	0.27	0.87	1.1	0.22

* Asit (Konsantre) : H₂O₂ (30%) : H₂O

Aşındırmak istediğimiz kalınlık nm metrebesinden olduğundan dolayı örnekler toplam 30 s olmak üzerer; 15 s'lik sürelerde aşamalı ve kontrollü olarak asit çözeltisinde bekletildi. Her 15 s'de aşındırılan kalınlık profilmetre (KLA tencor) yardımıyla ölçüldü. Şerit kontak şeklindeki örneğin aşındırma profili Şekil 3.7'de verilmektedir (örnek üzeri fotodirenç ile kaplı). Örneklerin aşındırma kalınlıkları 200-250 nm aralığındadır. Aşındırma işlemi tamamlandıktan sonra örnek yüzeylerindeki fotodirencin temizlenmesi için sırasıyla asteen - DI su – alkol – DI su uygulandı.



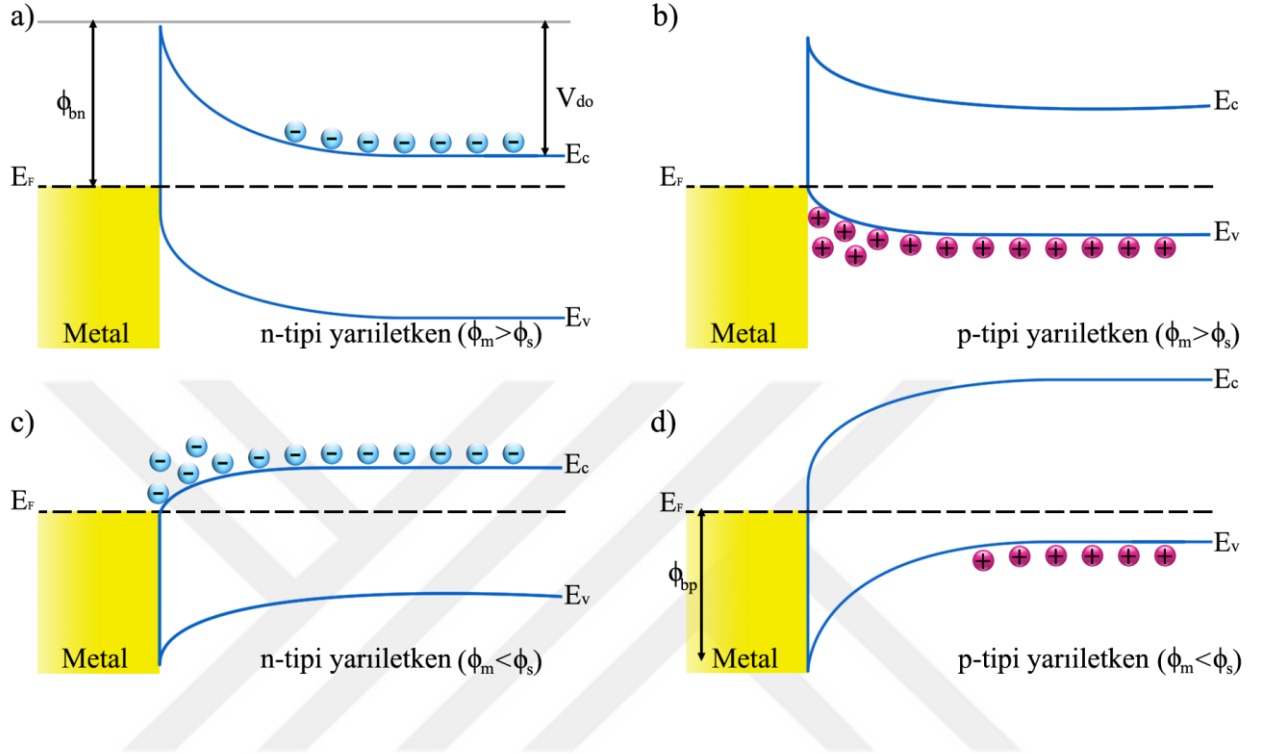
Şekil 3.7: Aşındırma sonrasında profilmetrede ölçülen örneğin kalınlığı.

3.2.6. Metalizasyon İşlemi

Örneklerin elektrotlarını oluşturarak çalışan bir devre elde etmek için elektriksel kontak almak için metalizasyon işlemi uygulanır. Yarıiletken cihazların ve entegre devrelerin fabrikasyonunda yaygın olarak Shottky ve Ohmik kontak olarak bilinen iki tür metal-yarıiletken kontak kullanılır. Yarıiletken bir cihazın mükemmel performansına ulaşmak için iyi omik kontaklar gereklidir. Ohmik kontak, herhangi bir voltajı düşürmeden gerekli akımı ideal olarak geçiren bir kontak türüdür ve Ohm yasasında olduğu gibi doğrusal bir akım-voltaj (I-V) değerine sahiptir. Metaller, düşük dirençlerinden dolayı kontaklar için mükemmel malzemedir.

Yarıiletken/metal arayüzeyinde omik kontak olup olmadığını anlamak için her iki malzemenin iş fonksiyonları kıyaslanır. Eğer $\phi_m > \phi_s$ ise, $V_{do} = \phi_m - \phi_s$ pozitifdir ve bantlar yukarı doğru bükülür; n-tipi bir yarıiletken durumunda, bu, Şekil 3.8a'daki gibi, elektronların yarıiletkenden metale geçmek için aşması gereken bir bariyer oluşur, bu da düzeltici (Shottky) özelliklere yol açar. Öte yandan, p-tipi bir yarıiletken için Şekil 3.8b'de, bant bükülmesi boşlukların hareketini engellemez ve bir ohmik kontak oluşur. Eğer $\phi_m < \phi_s$ ise, bantlar aşağı doğru bükülür. Bu, n-tipi bir yarıiletken için Şekil 3.8c'de ohmik bir kontak verirken boşluklar, oluşan

bariyerden geçmekte zorlandıklarından, p-tipi bir yarıiletken için Şekil 3.8d’de bir doğrultucu (Shottky) kontak verir [64].



Şekil 3.8: Metal yarıiletken heteroyapıların band yapıları a) $\phi_m > \phi_s$ n-tipi yarıiletken, b) $\phi_m > \phi_s$ p-tipi yarıiletken, c) $\phi_m < \phi_s$ n-tipi yarıiletken, d) $\phi_m < \phi_s$ p-tipi yarıiletken.

Çalışma kapsamında metalizasyon süreci ilk olarak aşındırma işlemi yapılan örneklerin üzeri döndürerek kaplama yöntemi (spin coating) ile AZ5214 pozitif fotodirenç ile kaplandı. Döndürerek kaplama işleminde, 5 s 500 rpm, 30 s 7000 rpm ve daha sonra 6000 rpm'e ulaştıktan sonra dönme süresi 60 s olacak şekilde ayarlandı ve kaplama tamamlandı. Yüzeyi homojen olarak kaplanmış örnek, fotodirenç çözeltisi içinde bulunan çözücü konsantrasyonunun buharlaşması, fotodirençin örnek yüzeyine daha iyi tutunması için 90 °C'de 30 s kadar ısıtıldı. Ardından daha önce örnek üzerinde oluşturduğumuz Simple bar şekline uygun olarak şeklin maskedeki negatif deseni olan kontak maskesi Şekil 3.9'da örnek üzerinde oluşturulmuş işaretler referans alınarak hizalandı ve örnekler 35 saniye UV ışığa maruz bırakıldı. UV ışığa maruz bırakılan örnekler developer-DI su (1:3) çözeltisinde yaklaşık 30 s tutularak metal kaplanacak yerler (UV ışığa maruz kalmış bölgeler) fotodirençten arındırılmış oldu. Ardından DI su ile yıkanarak saf azot gazı ile kurutuldu.

Metalizasyon sonrasında örneğin üzerindeki metal kaplı fotodirencin daha rahat temizlenmesi için metalizasyon işlemi öncesinde fotodirenç kaplı develop edilmiş örnekler fotodirencin biraz bozulması için bir süre maskesiz olarak UV ışığa maruz bırakıldı. Bu aşamadan sonra örnekler metal kaplamaya hazır hale gelir.

Tablo 3.2: Metal/yarıiletken kontakların elektriksel yapısı.

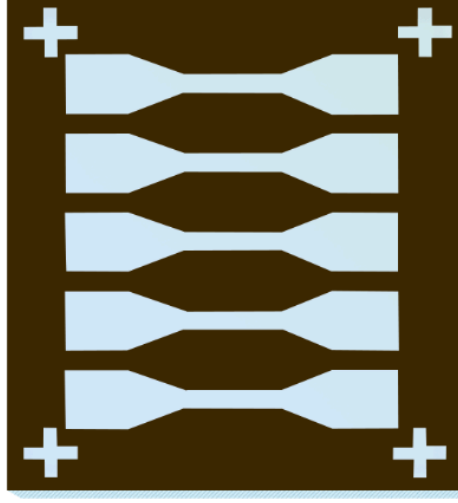
İş fonksiyonu	n-tipi yarıiletken	p-tipi yarıiletken
$\phi_m > \phi_s$	Shottky kontak	Ohmik kontak
$\phi_m < \phi_s$	Ohmik kontak	Shottky kontak

Metal kaplama olarak PVD (Physical Vapor Deposition) ve CVD (Chemical Vapor Deposition) olarak adlandırılan teknikler vardır. Bu çalışma kapsamında metal kaplama işlemi yaygın PVD tekniği olan termal buharlaştırma yöntemi ile gerçekleştirildi.

Termal buharlaştırma sürecinde, kaplamak istenen malzemelerin miktarı kaplama kalınlığına ve alaşımlama oranına göre belirlenir. Daha sonra hedef malzeme, elektrik akımının geçmesiyle ısıtılan bir potanın içine yerleştirilir ve malzeme buharlaşma noktasına kadar ısıtılır.

Buharlandıktan sonra, hedef malzemenin molekülleri örnek yüzeyine doğru hareket eder ve örnek yüzeyinde ince bir film oluşturur. Bu süreçte buharlaşan moleküller haznedeki gaz molekülleri ile çarpışırsa, termal enerji ile örnek yüzeyine giderken istenmeyen değişikliklere uğrayacak ve bu da örnek yüzeyinde kusurlara yol açacaktır. Bu tür olumsuz etkenleri önlemek için termal buharlaştırma işlemi yüksek vakumlu ortamda gerçekleştirilmelidir.

Metalizasyon işlemi yüksek vakum ortamı sağlayan termal buharlaştırma sisteminde (Vaksis twin chamber thermal evaporator) yaklaşık $\sim 2 \times 10^{-5}$ Torr'luk yüksek vakum ortamında gerçekleştirildi. Bu basınçta moleküllerin ortalama serbest yolu uzun olacağından başka bir moleküle çarpmadan düz bir çizgide örnek yüzeyine ulaşabilir.



Şekil 3.9: Şerit kontak (simple bar) şeklinde oluşturulmuş kuartz üzerine krom kaplı kontak maske.

Termal buharlaştırma sistemine yerleştirilen örnekler sırası ile 10 nm Au, 120 nm Au-Ge (%88 Au, %12 Ge), 20 nm Ni ve son olarak 200 nm Au kaplandı (Au/Ni/AuGe/Au). Metal- n-tipi yarıiletken eklemesinde iyi bir ohmik kontak davranışı elde etmek için Ni/AuGe metal alaşımı yaygın olarak kullanılan bir alaşımdır.

Son olarak, n-tipi olarak kaplama reçetesi uygulanmış örnekler fotodirenç kaldırma işlemi (Lift-off) için aseton içerisinde, metal kaplı bölgenin altındaki fotodirenç tabakasını kalkması için bir süre bekletildi. Örnek yüzeyindeki fotodirenç tamamen kaldırıldıktan sonra örnek DI su ile temizlendi ve saf azot ile kurutuldu.

Fotolitografi fabrikasyonu süreçleri Tablo 3.3’de ve şematik olarak Şekil 3.11’de gösterilmektedir.

3.2.7. Isıl İşlem

İstenilen cihaz performansını elde etmek için pürüzsüz yüzey morfolojisine ve minimum kontak direncine ulaşmak gerekir. İyi bir ohmik kontak sağlamak için, metalizasyon işleminden sonra örnekler hızlı ısıtma işlem cihazında (Solaris 100 rapid thermal processing system) farklı sıcaklıklarda tavlandı. Isıl işlem sırasında oksitlenmeyi önlemek için örneklerin bulunduğu ortama saf azot gazı verilmiştir. Isıl işlemde, sıcaklık ve ısıtma süresi kontak direncini ve akım-voltaj karakteristiğini doğrudan etkiler. Bu yüzden ısıtma işleminden sonra örnek üzerindeki

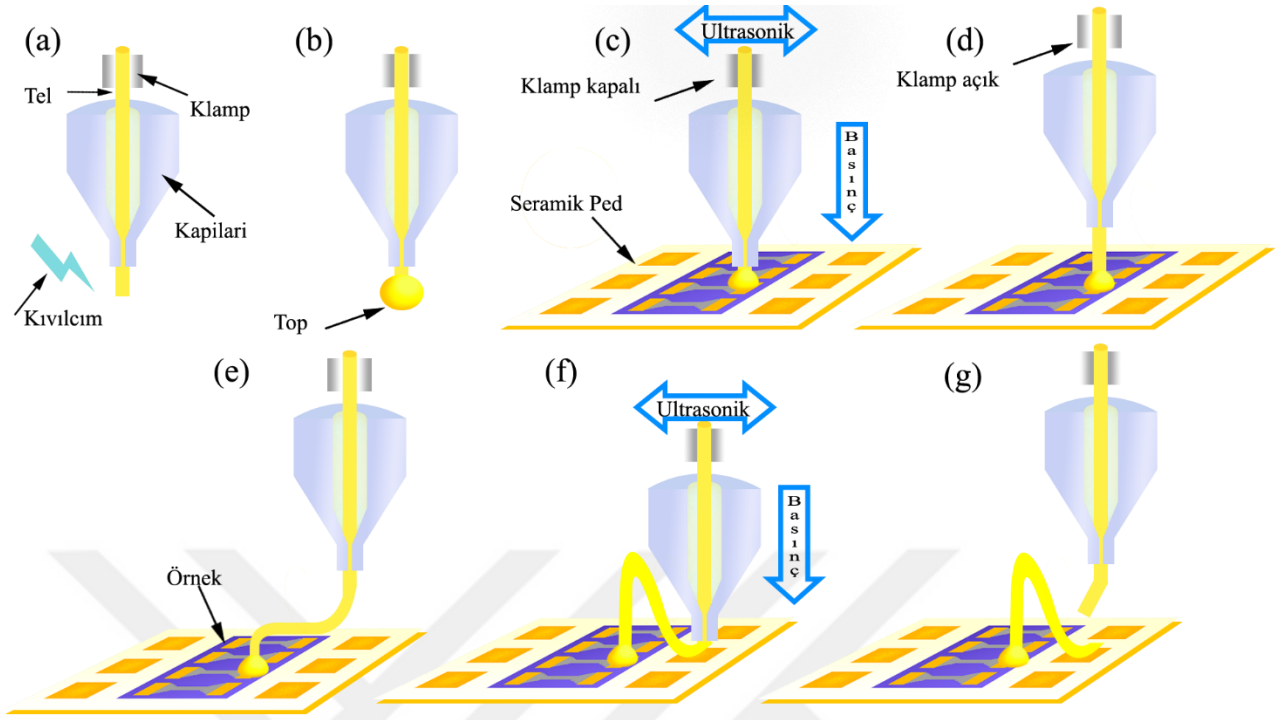
kontakların özelliklerinde meydana gelen değişimler hakkında bilgi edinmek için örneklerin I-V karakteristikleri incelenir. Isıl işlem görmüş örnekler Probe Station (Signatone 1160 Series) cihazında örneğin dirençleri ve kontakları arası ohmik davranışın elde edilip edilmediği kontrol edilir. Örneklere 430°C’de 30 saniye ısıtıl işlem uygulanmıştır. Bu sıcaklıkta Au:Ge sıvı fazdadır.

3.2.8. Tel Bağlama

Fabrikasyon süreçlerinin son adımı olan tel bağlama; yarıiletken kristal yongaları bir alt tabakanın terminallerine bağlama, kritik bir üretim adımdır. Tel bağlama teknikleri, entegre devre cihaz bağlantılarının büyük çoğunluğunda kullanılmaktadır. İnce telleri cihaz terminallerine bağlamak için bağlama telleri, termal enerji, basınç ve ultrasonik titreşimler kullanılır. Yarıiletken endüstrisinde önemli ve kritik bir süreç olduğu gibi örneklerin bazı elektriksel karakterizasyonlarının yapılması açısından gerekli bir adımdır. Kapilari profili, bağlama sıcaklığı, bilye çapı ve bağ tel malzemesi gibi birçok tel bağlama parametreleri, tel bağlama kalitesini etkileyebileceğinden parametre optimizasyonu önemlidir. Tel bağlama işleminde genel olarak insan saçından daha ince olan 25 µm veya 50 µm çaplı ince altın ve alüminyum teller kullanılır.

Tez çalışması kapsamında incelenen örneklerin bağlantıları Kulicke & Soffa 4524AD model Wire Bonder cihaz ile yapılmıştır. Yüzeyinde şerit kontak deseni oluşan örnek, ilk olarak ge-varnish ile elektronik ölçümlerde ara bağlantıyı sağlayan, 6 adet noktası altın ile kaplı seramik bir ped üzerine yapıştırıldı ve tel bağlama işlemine hazır hale getirildi.

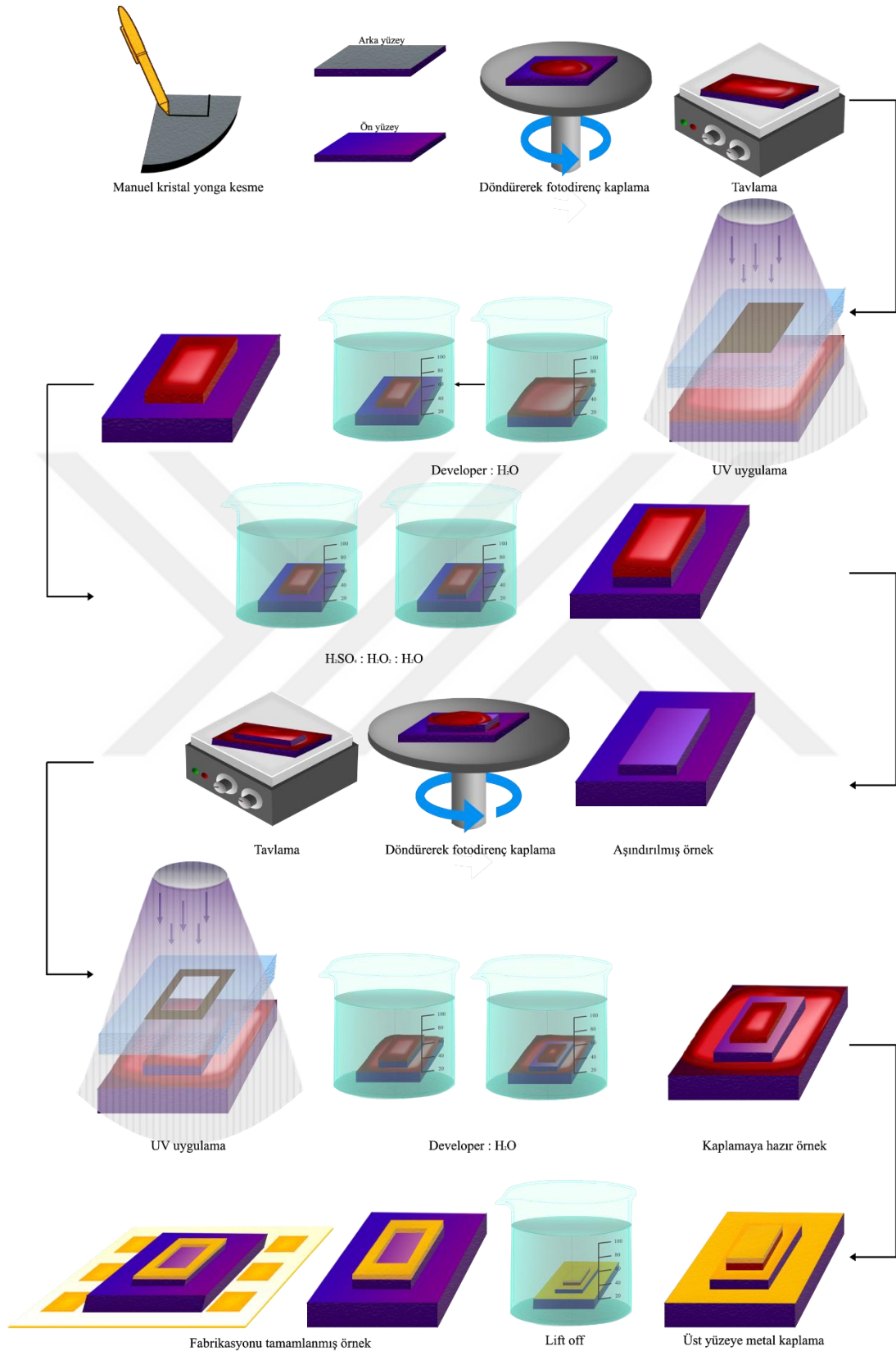
Wire Bonder cihazı, içinden ince bağ telinin geçirildiği bir kapilari kullanır. Bağ telinin ucunda top tipi oluşturmak için bir elektrik kıvılcımı kullanılır. Oluşturulan top, ısı, ultrason enerjisi veya her ikisi (termosonik) uygulaması altında örnek yüzeyine bastırıldı ve ilk bağ oluşturuldu. Daha sonra örnekten seramik taşıyıcının istenen noktasına gidilerek bağlantı yapıldı ve tel kenetliyen (klamp kapalı) kapilari çekilir ve telin kopmasına neden olur. Telin bu kopuşu/kesilmesi, kontak alma döngüsünün tamamlanması ile sonuçlanması anlamına gelir. Genel olarak GaAs tabanlı örneklerde de geçerli olan, güç, kuvvet, döngü, örneğin yerleştirildiği tabla sıcaklığı gibi parametreler ayarlandıktan sonra Şekil 3.10’da gösterildiği gibi örnek yüzeyine bağlantı gerçekleştirildi. Bu işlem şerit kontak geometrisindeki tüm kontaklar için tekrarlandı. Böylelikle elektriksel ölçümler için örnek hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.10: a) Telin ucuna elektrik kıvılcım (spark) uygulama b) Oluşan kıvılcım sonucu altın telin ucu eriyerek top oluşumu c) Örnek yüzeyine ilk bağın yapılması d) Tel bağlandıktan sonra örnek yüzeyinden uzaklaşması e) Kapılarınin seramik pedin kontağına doğru ilerlemesi f) Seramik ped üzerine bağ yapılması g) Tel bağlama işleminin sonlanması.

Tablo 3.3: Bu çalışmada izlenen fabrikasyon adımları.

İşlem	Açıklama
Kristal yonga kesme	Manuel olarak elmaz uçlu kalem ile kesme.
Kristal yonga temizleme	50 °C aseton ve 60 °C izopropil alkol içerisinde birer daika bekletildi. Her işlem sonrası bol DI su ile temizlenerek kuru atot ile kurutuldu ve 110 °C’de 1 d ısıtıldı
Optik mikroskop	Yüzey temizliği kontrol edildi.
Fotodirenç kaplama	Döndürerek kaplama yöntemi ile (5000 rpm, 1000 rpm, 1 d) AZ5214E kodlu fotodirenç kaplandı.
Isıtma	90 °C’de 30 s ısıtıldı.
UV ışık uygulama	Maske hizalayıcı yardımı ile 35 s UV ışığa maruz bırakıldı.
Isıtma	110 °C’de 10 s ısıtıldı.
Develop	Kristal yonge üzerinde kullanılan maske deseni belirgin olana kadar Developer (AZ400K) : H ₂ O (1:3) karışımında bekletildi ve ardından DI su ile temizlendi.
.Isıtma	110 °C’de 1d ısıtıldı.
Kalınlık ölçümü	Profilmetre ile fotodirenç kalınlığı ölçüldü.
Aşındırma	1H ₂ SO ₄ : 8H ₂ O ₂ : 160H ₂ O çözelti içerisinde 30 s bekletildi ve ardından DI su ile temizlendi.
Isıtma	110 °C’de 30 s ısıtıldı.
Derinlik ölçümü	Profilmetre ile toplam derinlik ölçüldü.
Kristal yonga temizleme	50 °C aseton ve 60 °C izopropil alkol içerisinde birer daika bekletildi. Her işlem sonrası bol DI su ile temizlenerek kuru atot ile kurutuldu ve 110 °C’de 1 d ısıtıldı
Fotodirenç kaplama	Döndürerek kaplama yöntemi ile (5000 rpm, 1000 rpm, 1 d) AZ5214E kodlu fotodirenç kaplandı.
Isıtma	90 °C’de 30 s ısıtıldı.
UV ışık uygulama	Maske hizalayıcı yardımı ile 35 s UV ışığa maruz bırakıldı.
Isıtma	110 °C’de 10 s ısıtıldı.
Develop	Kristal yonge üzerinde kullanılan maske deseni belirgin olana kadar Developer (AZ400K) : H ₂ O (1:3) karışımında bekletildi ve ardından DI su ile temizlendi.
Kalınlık ölçümü	Profilmetre ile toplam derinlik ölçüldü.
Metal kaplama	Au/Ni/AuGe/Au kaplandı.
Kristal temizleme	50 °C aseton ve 60 °C izopropil alkol içerisinde birer daika bekletildi. Her işlem sonrası bol DI su ile temizlenerek kuru atot ile kurutuldu ve 110 °C’de 1 d ısıtıldı.
Seramik pede yapıştırma	Metalizasyonu tamamlanan örnekler gümüş pasta yardımı ile seramik örnek taşıyıcı üzerine yerleştirildi.
Tel bağlama	Örnekler üzerindeki metal kaplama üzerinden wire bonder yardımıyla seramik üzerindeki altın pede altın tel ile bağlar yapılarak örneklerin fabrikasyonu tamamlandı.



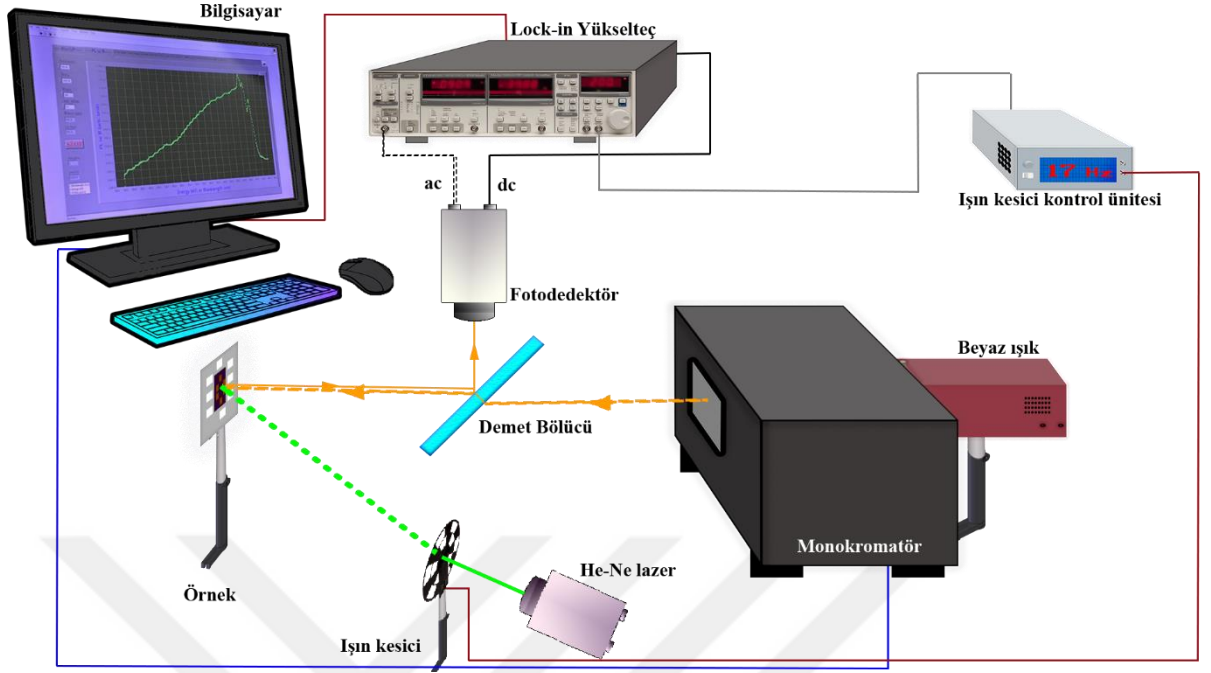
Şekil 3.11: Örneklerin fabrikasyon sürecinin şematik gösterimi.

3.3. ÖRNEKLERİN KARAKTERİZASYONU

3.3.1. Optik Karaterizasyon

Madde üzerine elektromanyetik dalga (foton) geldiği zaman ışık dalgasının yansıması, iletimi, soğurulması, saçılması ve kırılması olacaktır. Modülasyon spektroskopisinin dış uyarmı şekline bağlı olarak adlandırılan fotoyansıma (PR) ve elektroyansıma (ER) ve absorpsiyon spektroskopisi, enerji bant yapısı, optik geçiş enerjileri, kuantum kuyu derinlikleri ve tuzak seviyeleri gibi yarıiletken özelliklerinin analizinde kullanılan yararlı metodlardan biridir. Modülasyon spektroskopisi yöntemlerinden olan PR spektroskopisi, dış bir periyodik etki ile dielektrik fonksiyonunun modülasyonuna dayanır. Bu modülasyon, dış etki ile (ışık kaynağı) periyodik olarak elektron-boşluk çiftinin yaratılıp-yok edilmesi ile gerçekleşir. Elektron-boşluk çift sayısının değişmesi, taşıyıcı konsantrasyonuna bağlı olan dielektrik fonksiyonunun modülasyonu sağlar, ve dolayısıyla tüm optik süreçlerin modülasyonuna sebep olur. Bu modülasyonun gerçekleşebilmesi için yapının heteroeklem yapıda veya kendiliğinden iç elektrik alanın (build-in) olması gerekmektedir. Bu modülasyon sonucu oluşan değişim, sadece yapı içerisinde dielektrik sabitinin bant kenarı enerjileri ve/veya lokalize enerji seviyelerine karşılık gelen enerji değerlerinde gözlenir. Bu değişim, çok küçük enerji aralığında çok zayıf olarak gerçekleşir. Eğer sadece zayıf değişim ölçülürse, spektrumda çok keskin türevimsi geçişler olarak gözlenir. Gözlenen türevimsi spektrum, optik geçiş enerjilerinin daha hassas bir şekilde belirlenmesine olanak sağlar. Ayrıca, sadece değişimin ölçülmesi, diğer deneysel yöntemlerle oda sıcaklığında gözlenemeyen optik geçişlerin bile gözlenmesine olanak sağlar. Bu yönüyle, PR avantajlı bir deneysel yöntemdir.

Modülasyon spektroskopisinin sinyali analizinde, indüklenen ve kendiliğinden var olan iç elektrik alanın büyüklüğüne bağlı olarak analiz edilmektedir. Farklı elektrik alan büyüklüğüne bağlı olarak sinyal analizi araştırma grubumuz tarafından da başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Bu nedenle sinyal analizi konusunda detaylı bilgiye Referans [65-67] ulaşılabilir. Bu çalışmada, PR spektrumunun analizi için üçüncü türevli fonksiyonel form (TDFF) kullanılmıştır.



Şekil 3.12: Spektral yansıma ölçüm düzeneği.

Bu çalışmada kullanılan deney düzeneği Şekil 3.12’de verilmiştir. PR, uzay yüklü bölgesinde (SCR) elektronların elektrik alanla etkileşimine dayanır. Elektron ve boşlukları yaratıp-yok etmek için malzemenin yasak bant aralığından büyük enerjiye sahip olan lazer ışığı periyodik olarak ışın kesici ile dilimlenerek örnek üzerine düşürülür. Işık örnek üzerine düştüğünde, yüzeyde ve yüzeye yakın bölgede elektron-boşluk çifti oluşur ve modülasyon gerçekleşir. Modülasyon sonucu oluşan değişimi belirlemek için karacisim ışıması yapan ışık kaynağından çıkan elektromanyetik dalgalar, monokromatörden geçirilerek tek renkli hale gelir. Tek renkli elektromanyetik dalgalar, uyarıcı ışık (lazer) ile örnek yüzeyinde çakışacak şekilde örnek üzerinde aynı yere düşürülür. Periyodik olarak modüle edilmiş bölgeden yansıyan elektromanyetik dalgalar modülasyon etkisini içeren ac ve modülasyonsuz etkiyi gösteren dc bileşenden oluşur. Şekil 3.12’de verilen deney düzeneğinde ac etki kesikli, dc etki sürekli çizgi ile gösterilmiştir. Yansıyan elektromanyetik dalgalar dedektör üzerine yönlendirilir. Dedektör üzerine hem ac hem de dc bileşenden oluştuğu için dedektör çıkışı da hem ac hem de dc bileşen içerir. Ac sinyal bileşeni, sadece ac sinyalleri ölçen sinyal kilitlenmeli akım/voltaj yükselticinin (lock-in amplifier, LIA) ön panel girişine bağlanır. LIA’nın ön panel girişi, sadece kesikli/ac lazer frekansı ile aynı ac frekansdaki sinyalleri okur. Dc dedektör çıkışı, LIA’nın arkada panelinde bulunun voltmetre ile ölçülür. Bu iki sinyalin oranı alınarak PR sinyali elde edilir.

Bu tez çalışmasında, modülasyon sinyalinin analizi herhangi bir varsayım yapılmadan modülasyon sinyal fonksiyonları kullanılarak yapılmıştır. Modülasyon spektrumunun analizinde üçüncü türev fonksiyonel formu sinyal şekline sahip spektrumun analizi verilecektir. TDFF sinyal şekli aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\Delta R}{R} \approx \text{Re} \left[A e^{-i\phi} (E - E_g + i\Gamma)^{-m} \right] + f(E) \quad (3.1)$$

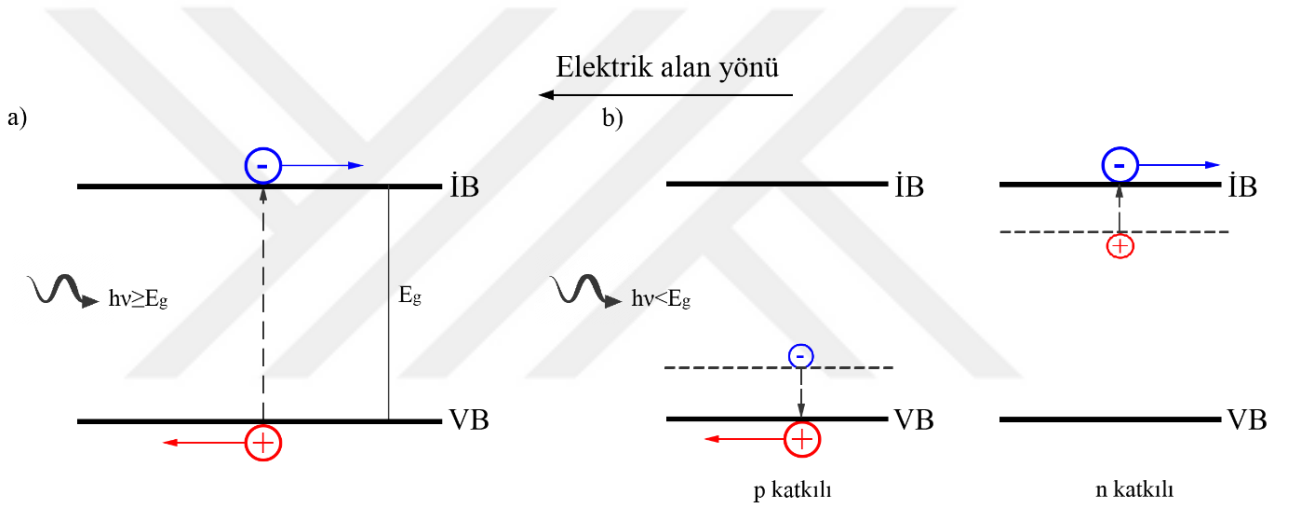
Burada, m kritik nokta tipine bağlı sabittir ve malzemenin boyutuna bağlı olarak değişmektedir, ϕ faz açısıdır ve $f(E)$ fonksiyonu ise, istenmeyen sabit veya değişken taban durum (background) etkilerini kaldırmak için kullanılır [68].

3.3.2. Elektro-optik karakterizasyon

Spektral fotoiletkenlik, nanoyapıların karakterizasyonu için önemli metodlardan bir tanesidir. Fotoiletkenlik, katılarda temel bir süreç olup, yük taşıyıcıların üretilmesini ve rekombinasyon (tekrar birleşmesi) süreçlerini içerir. Spektral foto-akım (SPC) yöntemine dayanan fiziksel mekanizma, örnek üzerine düşürülen fotonlar soğrularak valans bandından elektronların iletkenlik bandına geçmesi ile başlar. Elektronların valans bandından iletkenlik bandına geçmesiyle VB’da boşluklar, iletkenlik bandında elektronlar oluşur. Oluşan bu elektron boşluk çift uygulanan dış elektrik alanla farklı yönler yönlendirilerek elektrik kontaklarına ulaşması sağlanır. Farklı kontaklara ulaşan elektron ve boşluk devreden akım geçmesine neden olur. Devreden geçen akım, örnek üzerine düşürülen monokromatik dalganın dalga boyuna bağlıdır, ve dalga boyuna bağlı değişim çizdirildiğinde PC spektrumu elde edilir. Yarıiletken malzeme üzerine gönderilen fotonun soğurulması ile elektron – boşluk çiftinin oluşması bant kenarları dışında farklı seviyeler varsa bu seviyelerden kaynaklanan geçişlere ait değişimlerin ölçülmesine olanak sağlar. Bu yüzden malzemelerin fiziksel özellikleri hakkında faydalı ve değerli bilgiler verir.

Bantdan banda geçiş ve tuzak seviyelerinden banda geçiş olarak bilinen Şekil 3.13’de gösterildiği gibi iki tür fotoiletkenlik mümkündür. Bant aralığı değerinden daha yüksek veya ona eşit foton enerjisi ($h\nu \geq E_g$) için bantdan banda geçiş meydana gelir, böylece her iki türden taşıyıcılar üretilir, fakat tuzak seviyelerinden banda geçiş de ise, bant aralığından düşük foton

enerjisi ($h\nu < E_g$) tarafından üretilir ve taşıyıcıların derin seviyelerden her iki banda geçişlerini uyarabilir [69]. Safsızlık seviyelerini genellikle sığ olmalarından dolayı bant aralığından düşük foton enerjileri bu seviyeleri uyarmak için yeterlidir. Eğer gelen fotonların enerjisi, katkılı malzemede safsızlık atomlarının iyonize enerjisine eşit olduğunda, iyonize olurlar ve iletkenlik bandında fazla elektronlar oluştururlar ve dolayısıyla iletkenlikte bir artış gözlenir. Bu iki mekanizma sonucunda iletkenlik bandında (p katkılı ise valans bandında) üretilen fazlalık taşıyıcılar yarıiletkenin iletkenliğini değiştirir. Bu değişim dış devredeki akımdaki değişikliğe sebep olur.



Şekil 3.13: Gelen fotonun soğrulmasının şematik diagramı a) hem elektronların hem de boşlukların oluşturulmasını içeren banttan banda geçişler, b) bantdan safsızlık seviyesine geçişler – yalnızca tek tür taşıyıcı oluşturulur.

Fotoiletkenlik etkisinin ölçümü, elektrik kontakların ve malzemedeki fotonla üretilen (photogenerated) taşıyıcıların ölçülmesi için bir elektrik alanının uygulanması gerekir. Elektrik kontaklarının iyi performansına sahip olmak için genel olarak, omik kontak yük taşıyıcıların taşıma modelini belirlemek ve bazı durumlarda sığ seviyelerin rolünü gözlemlemek için yararlıdır [70]. Bu konfigürasyonda, fotoiletkenlik, karanlık elektrik iletkenliğindeki değişiklik ile ilişkilidir:

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p) \quad (3.2)$$

Burada e elektron yükü, n ve p sırasıyla serbest elektron ve boşluk yoğunlukları, μ_n ve μ_p sırasıyla elektron ve boşluk mobilitesi. Eğer yarıiletken malzeme homojen ise, n , p , μ_n ve μ_p malzemede homojen olarak dağıldıysa, iletkenlik $\Delta\sigma$, çoğu durumda, serbest taşıyıcı yoğunluklarının, Δn ve Δp artışına bağlı olarak artar [69]:

$$\Delta\sigma = e(\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p) \quad (3.3)$$

Genellikle tek katkılı (unipolar) yarıiletkenlerde sadece çoğunluk taşıyıcı transportu, n-tipi yarıiletkenler için elektronlar ve p-tipi yarıiletkenler için boşluklar dikkate alınır. Artan serbest taşıyıcı yoğunluğu Δn , $G\tau_{n,p}$, 'nin çarpımı olarak yazılabilir, burada G birim hacim başına serbest elektronların ve boşlukların oluşum hızıdır ve $\tau_{n,p}$ fazla elektronların veya boşlukların ortalama yaşam süresidir [71]. Denklem 3.2'de yerine yazarsak:

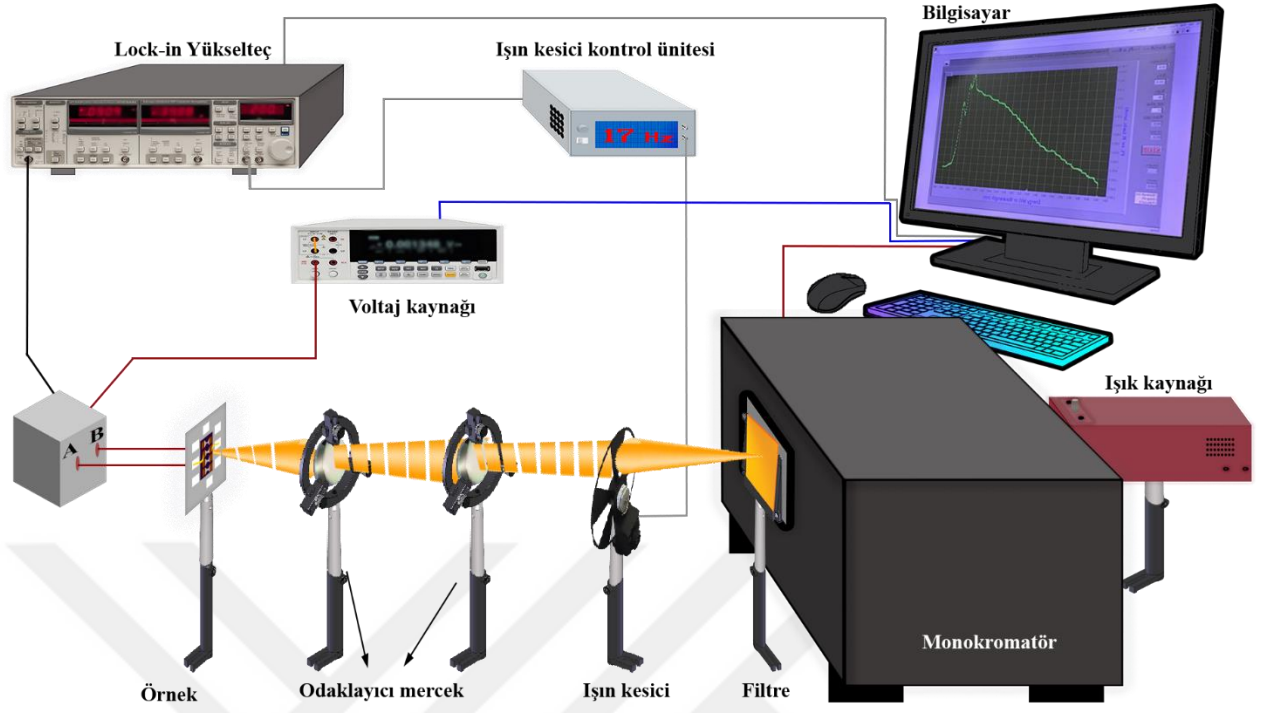
$$\Delta\sigma = eG(\mu_n\tau_n + \mu_p\tau_p) \quad (3.4)$$

Yansıma ve absorpsiyon parametrelerini dikkate alarak denklemi yeniden yazarsak:

$$\Delta\sigma = eG(1 - R)(1 - e^{-\alpha x})(\mu_n\tau_n + \mu_p\tau_p) \quad (3.5)$$

Yukarıdaki denklemde gösterildiği gibi taşıyıcıların mobilitesi ve ömrü fotoiletkenlikte (PC) önmeli parametrelerdir. Burada R yansıma katsayısı, α absorpsiyon katsayısı, x ışığın ilerleme derinliğidir (penetration depth).

Fotoiletkenlik ölçümlerinde örneğe besleme voltajı uygulanır. Spektral fotoiletkenlikte (SPC), tüm yasak band aralığını araştırmak için geniş bir bant aralığını kapsayan bir ışık kaynağı kullanılır. Işık Örnek üzerine ışık düşürüldüğü zaman elektron-boşluk çifti oluşur. Işık kaynağının seçimi, seçici soğurma ile belirli sinyalleri ölçmek için önemlidir. Deneyde ışık kaynağı olarak kullanılan geniş bant aralıklı tungsten halojen lambadan çıkan beyaz ışık demeti, monokromatörün girişine odaklanır.



Şekil 3.14: Fotoiletkenlik ölçümleri için deney düzeneği.

Monokromatörden çıkan beyaz ışık, elektromanyetik spektrumun belirli bir bölgesi için geçirgen olan filtreden geçer ve ışın kesiciye düşürülerek belirli bir frekansta modüle edilir. Bu çalışma kapsamında bütün örnekler için ışın kesici frekansı 17 Hz olarak ayarlanmıştır. Geniş bant aralıklı tungsten halojen lambanın spektrumu düşük ışın kesici frekanslarında spektral duyarlılığı yüksek olan payro dedektör ile kaydedilmiş ve elde edilen fotoiletkenlik spektrumunun normalize edilmesi için kullanılmıştır.

Akım ölçümleri, lock-in yükselteç tarafından gerçekleştirildi. Monokromatörden çıkan monokromatik ışık örnek üzerine düştüğünde örnek uçlarında oluşan sinyal lock-in yükseltece gönderilir. Lock-in yükselteç referans frekans olan ışın kesicinin frekansındaki sinyalleri yükseltir. Lock-in yükselteçte yükseltiletilen sinyal Labview program yardımıyla bilgisayarda kaydedilir. Fotoiletkenlik deneyinde sinyal doğrudan örneğin uçlarından çıkar ve lock-in yükseltecin A ve B girişlerine bağlanır. Fotoiletkenlik ölçüm için kullanılan deney düzeneği Şekil 3.14’de verilmektedir.

3.3.3. Optik geçiş enerjilerin Comsol ile kuramsal hesaplaması

Sırasıyla Mn'sız ve Mn'lı GaAs/AlAs ve GaMnAs/AlAs kuantum kuyulu örneklerin optik geçiş enerjilerini kuramsal olarak hesaplamak için Comsol Multiphysics programının deneme sürümü kullanılmıştır.

Elektronların ve boşlukların dalga fonksiyonu ve enerji özdürümlarını belirlemek için Comsol Multiphysics içindeki yarıiletken modülü kullanılmıştır. Yarıiletken Modülü içerisinde yer alan *Schrödinger Denklem* arayüzeyi, kuantum sınırlı (quantum-confined) sistemlerde elektron dalga fonksiyonunu ve boşluk dalga fonksiyonunu hesaplamak için zarf (envelope) fonksiyonu yaklaşımını varsayar. Zarf fonksiyonu yaklaşımı zamana bağlı,

$$E\psi = H\psi \quad (3.6)$$

$$i \frac{\hbar}{2\pi} \frac{\partial \psi}{\partial t} = H\psi \quad (3.7)$$

denklemini ve kararlı (zamandan bağımsız) Schrödinger denklemi,

$$-\nabla \left(\frac{\hbar^2}{8\mu\pi^2} \nabla \psi \right) + V\psi = E\psi \quad (3.8)$$

Burada $\hbar = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ Planck sabiti, μ indirgenmiş kütle, V potansiyel enerji, E enerji özdeğeri, ψ kuantum mekanik dalga fonksiyonu.

Denklem 3.8'in analitik olarak çözülmesi için etkin kütlelerin ve potansiyelin (enerji) tanımlanması gerekmektedir. Potansiyel (enerji) değeri, Mn'lı ve Mn'sız örneklerin elektronik bant yapısı gözüne alınarak belirlenmesi gerekmektedir. Herbir örnek grubundaki en üst katmanın valans bandı enerjisi 0 eV olarak ayarlanmış ve diğer katmanlar için bant süreksizlik değerleri potansiyel (enerji) olarak belirlenmiştir. GaAs ve AlAs için kullanılan parametereler Adachi (1985), Vurgaftman ve diğ. (2001) ve Houng ve diğ. (1988) tarafından yapılan çalışmalardan alınmıştır. GaMnAs alaşımın hafif ve ağır boşluk için olan etkin kütle değerlerini Ohya ve diğ. tarafından yapılan çalışmadan alınmıştır [49] ve elektron etkin kütlesi GaAs elektron etkin kütle değerini kullanarak hesaplanmıştır. (100) doğrultusu için kullanılan parametreler, Tablo 3.4 ve 3.5'de verilmiştir. Denklemden yer alan parametrelerin örnek yapısına ait parametrelerin girilmesi gerekmektedir.

Tablo 3.4: (100) doğrultusundaki GaAs/AlAs için kullanılan parametreler. AlAs için verilen parametreler Γ -vadisi içindir.

İsim	Denklem	Açıklama
l_w	4[nm]	Kuyu genişliği
l_b	50 [nm]	Bariyer genişliği
m_{ew}	$0.067 \times m_0$	Kuyu bölgenin (GaAs) etkin kütlesi
m_{eb}	$0.15 \times m_0$	Bariyer bölgenin (AlAs) etkin kütlesi
m_{lhw}	$0.087 \times m_0$	Hafif boşluk için (GaAs) etkin kütle, kuyu bölgesi
m_{hhw}	$0.38 \times m_0$	Ağır boşluk için (GaAs) etkin kütle, kuyu bölgesi
m_{lhb}	$0.18 \times m_0$	Hafif boşluk için (AlAs) etkin kütle, bariyer bölgesi
m_{hhb}	$0.40 \times m_0$	Ağır boşluk için (AlAs) etkin kütle, bariyer bölgesi
E_{gw}	1.424 [V]	Kuyu bölgesinin (GaAs) bant aralığı
E_{gb}	3.099 [V]	Bariyer bölgesinin (AlAs) bant aralığı
CBO	$(E_{gb} - E_{gw}) \times 0.65$	İletkenli bant süreksizliği
VBO	$(E_{gb} - E_{gw}) \times 0.35$	Valans bant süreksizliği

m_0 : serbest elektron kütlesi

Tablo 3.5: (100) doğrultusundaki GaMnAs/AlAs için kullanılan parametreler.

İsim	Denklem	Açıklama
l_{wmn}	4 [nm]	Kuyu genişliği
$E_{gm n}$	1.43 [V]	Kuyu bölgesinin (GaMnAs) bant aralığı
m_{ew_mn}	$0.067 \times m_0$	Kuyu bölgenin (GaAs) etkin kütlesi
m_{hhw_mn}	$0.38 \times m_0$	Ağır boşluk için (GaMnAs) etkin kütlesi, kuyu bölgesi
m_{lhw_mn}	$0.09 \times m_{e_const}$	Hafif boşluk için (GaMnAs) etkin kütlesi, kuyu bölgesi

m_0 : serbest elektron kütlesi

Potansiyelin (enerji) belirlenmesi için öncelikle elektronik bant yapısının belirlenmesi gerekmektedir. AlAs/GaAs alaşımlarının elektronik bant yapısı Adachi ve diğ. (1998) çalışmasından alınarak belirlenmiştir. AlAs indirek bant aralıklı olduğu için herbir vadi parametresi kullanılarak optik geçişler hesaplanmıştır. Mn'lı külçe/bulk alaşımların elektronik bant yapısının belirlenmesi için Genel Kısımlar'da verilen bilgilerden yararlanılarak belirlenmiştir. Potansiyelin belirlenmesi için bulk GaMnAs alaşımlarının bant aralığı enerjisinin belirlenmesi gerekmektedir. Mn'lı örneklerin bant aralığı enerji değerleri Pela ve diğ. (2012) tarafında yapılan çalışmalardan yararlanarak belirlenmiştir.

Tablo 3.6: Örneklerin bant aralığı ve valans ve iletkenlik bandı için süreksizlik değerleri.

Örnekler	$E_g(AlAs)$	Bant aralığı enerjisi, $E_g(297 K)$ eV	İletkenlik bant süreksizlik değeri, eV (GaAs)	Valans bant süreksizlik değeri, eV (GaAs)
As100	3.099	1.424	1.088	0.586
As110	3.099	1.424	1.088	0.586
As311	3.099	1.424	1.088	0.586
As411	3.099	1.424	1.088	0.586
Mn100	3.099	1.43	1.084	0.584
Mn110	3.099	1.43	1.084	0.584
Mn311	3.099	1.43	1.084	0.584
Mn411	3.099	1.43	1.084	0.584

Yu ve diğ. (1992) tarafından yapılan çalışmalarda, CB bandı süreksizliği ve VB bandı süreksizliği sırasıyla, 65:35 ayrımı olarak rapor edilmiştir. Bu iletkenlik bandı süreksizlik değeri, AlAs bant aralığı, ve GaAs ve GaMnAs bant aralığı değerinden VB süreksizlik değerleri belirlenmiştir (Tablo 3.6). Tablo 3.4 (AlAs/GaAs), Tablo 3.5 (AlAs/GaMnAs) ve Tablo 3.6'da verilen parametreler kullanılarak enerji özdeğerleri ve dalga fonksiyonları belirlenmiştir.

İletkenlik ve valans bandı için belirlenen enerji özdeğerlerinden optik geçiş enerjileri hesaplanmıştır.

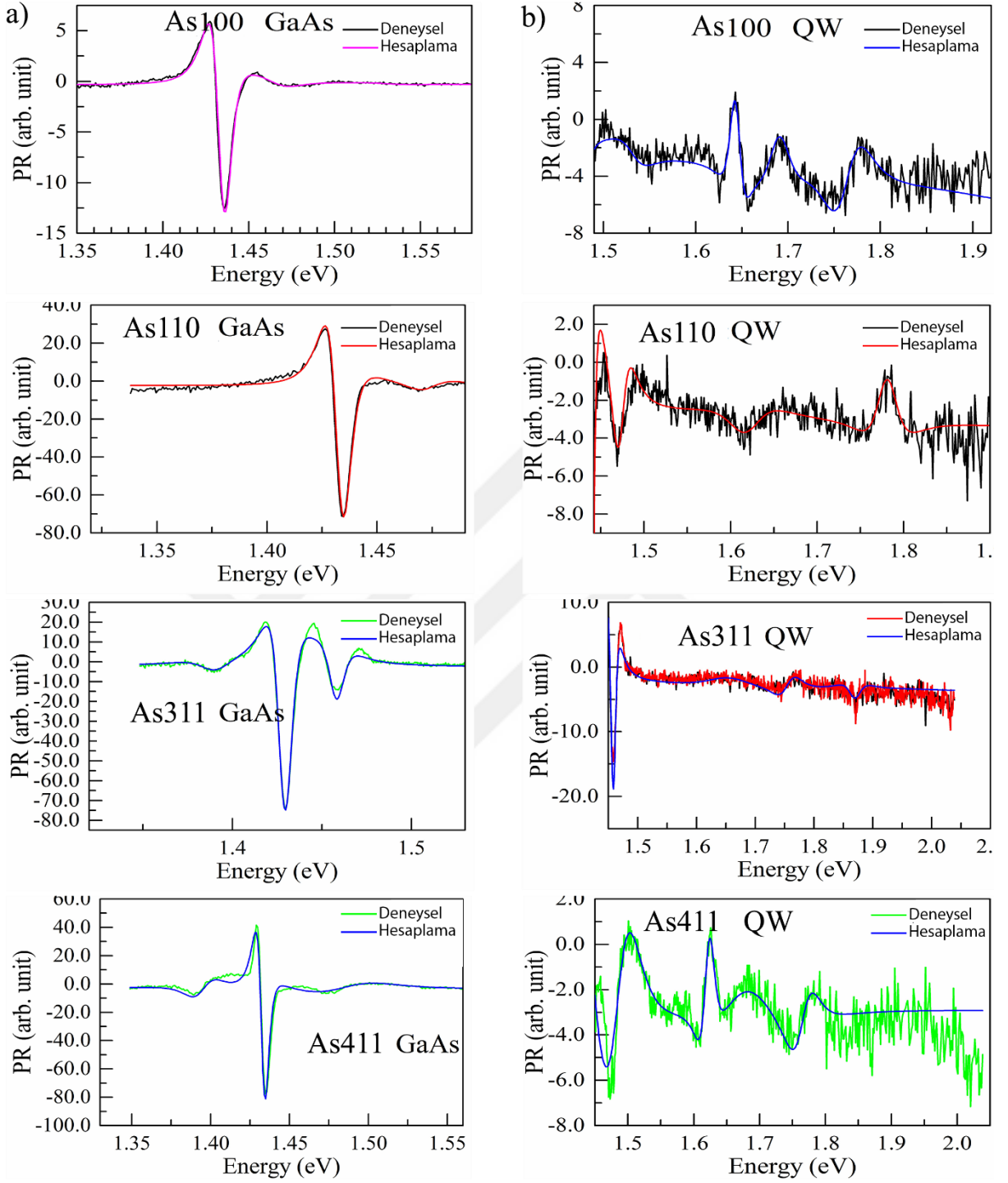


4. BULGULAR

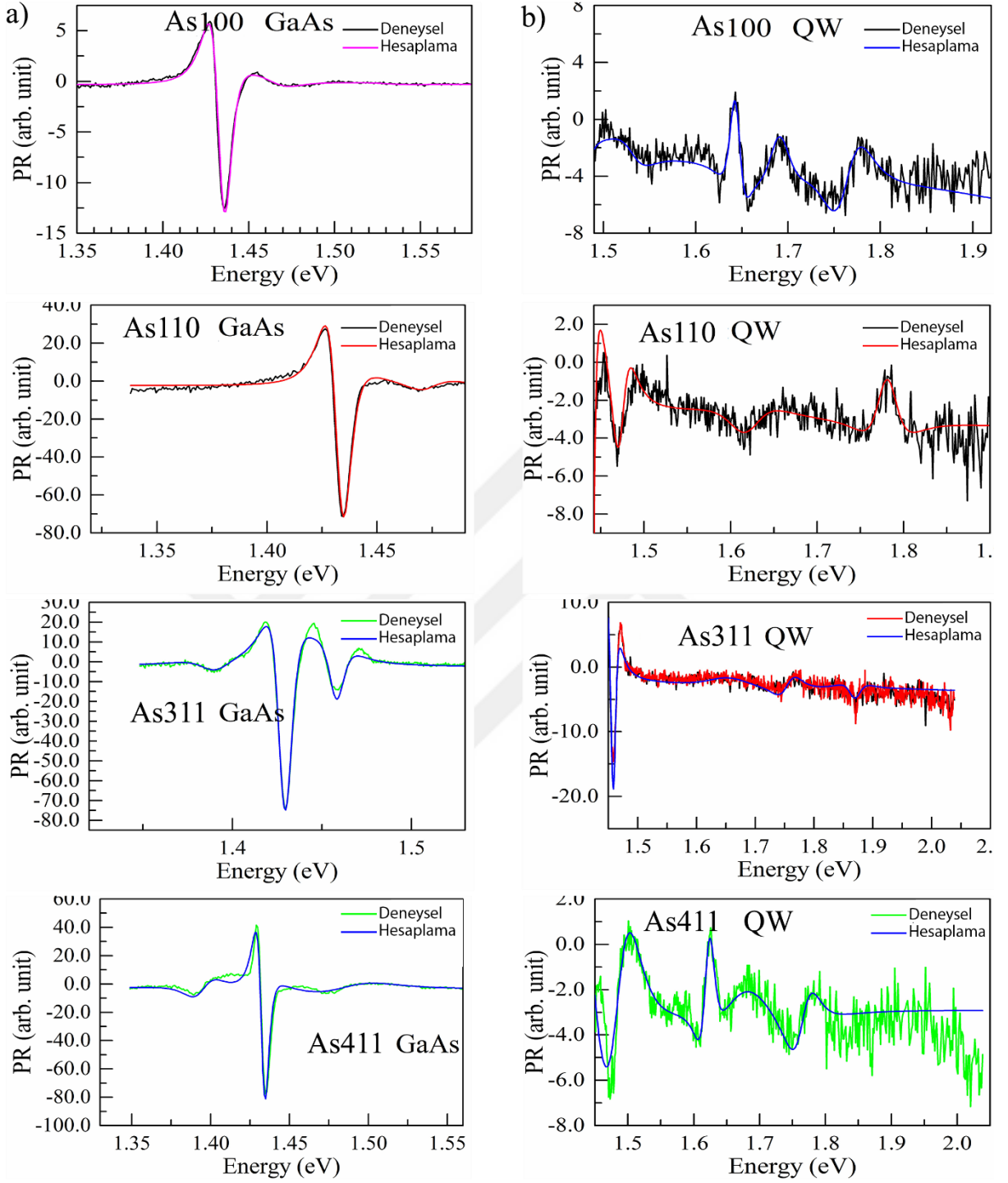
4.1. FOTOYANSIMA SONUÇLARI

Mn'sız As100, As110, As311 ve As411 ve Mn alaşımlı Mn100, Mn110, Mn311 ve Mn411 tüm örnekler için oda sıcaklığında fotoreflektans (PR) ölçümleri, 167 Hz frekansta kesilen modüle edici ışın olarak bir Ar – Ion lazer kullanılarak gerçekleştirildi. Denklem 3.1 kullanılarak, kuramsal PR spektrumu hesaplanmıştır. Hesaplanan kuramsal spektrum, deney sonuçları ile uyumlu bir sonuç elde edildi. (100), (110), (311)B ve (411)B doğrultularında büyütülmüş Mn'sız (referans) örneğinin PR ölçüm sonucu Şekil 4.1'de verilmiştir. Şekil 4.1a'da, en üst katman olan GaAs bant aralığından küçük bölgeye ait sonuçlar, Şekil 4.1b'de GaAs bant aralığından büyük enerji değerlerine ait sonuçlar verilmiştir. Şekil 4.2'de benzer şekilde (100), (110), (311)B ve (411)B doğrultularında büyütülmüş bulk Mn içeren alaşımların sonuçları verilmiştir.

PR spektrumlarının analizinden, GaAs katmanı enerjisi, yerel enerji seviyesi ve GaAs'in bant aralığından büyük enerjide 5 farklı optik geçiş enerjisi belirlenmiştir. Belirlenen optik geçiş enerjileri Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de verilmiştir. Tablolarda, Loc. ile gösterilen sütündeki enerji değerleri GaAs bant aralığından küçük olduğu için yerel enerji seviyelerinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir. PR analizinden belirlenen optik geçiş enerjilerin kaynağı kuramsal olarak hesaplanan enerji değerleri ile karşılaştırılarak belirlenecektir.



Şekil 4.1: (100), (110), (311)B ve (411)B doğrultularında büyütülmüş GaAs/AlAs kuantum kuyulu örneklerin PR ölçüm sonuçları. a) En üst katman olan GaAs bant aralığından küçük bölgeye ait sonuçlar ve b) GaAs bant aralığından büyük bölgeye ait sonuçlar.



Şekil 4.2: (100), (110), (311)B ve (411)B doğrultularında büyütülmüş GaMnAs/AlAs kuantum kuyulu örneklerin PR ölçüm sonuçları. a) En üst katman olan GaAs bant aralığından küçük bölgeye ait sonuçlar ve b) GaAs bant aralığından büyük bölgeye ait sonuçlar verilmiştir.

Tablo 4.1: PR spektrumundan GaAs/AlAs örnekleri için belirlenen optik geçiş enerjileri.

Örnek	Loc.	GaAs	AE-1	AE-2	AE-3	AE-4	AE-5
As100	-	1.434	1.468	1.513	1.644	1.690	1.763
As110	-	1.433	1.473	1.541	1.622	-	1.781
As311	1.385	1.429	1.458	-	1.659	-	1.756
As411	1.395	1.433	1.484	-	1.622	1.699	1.765

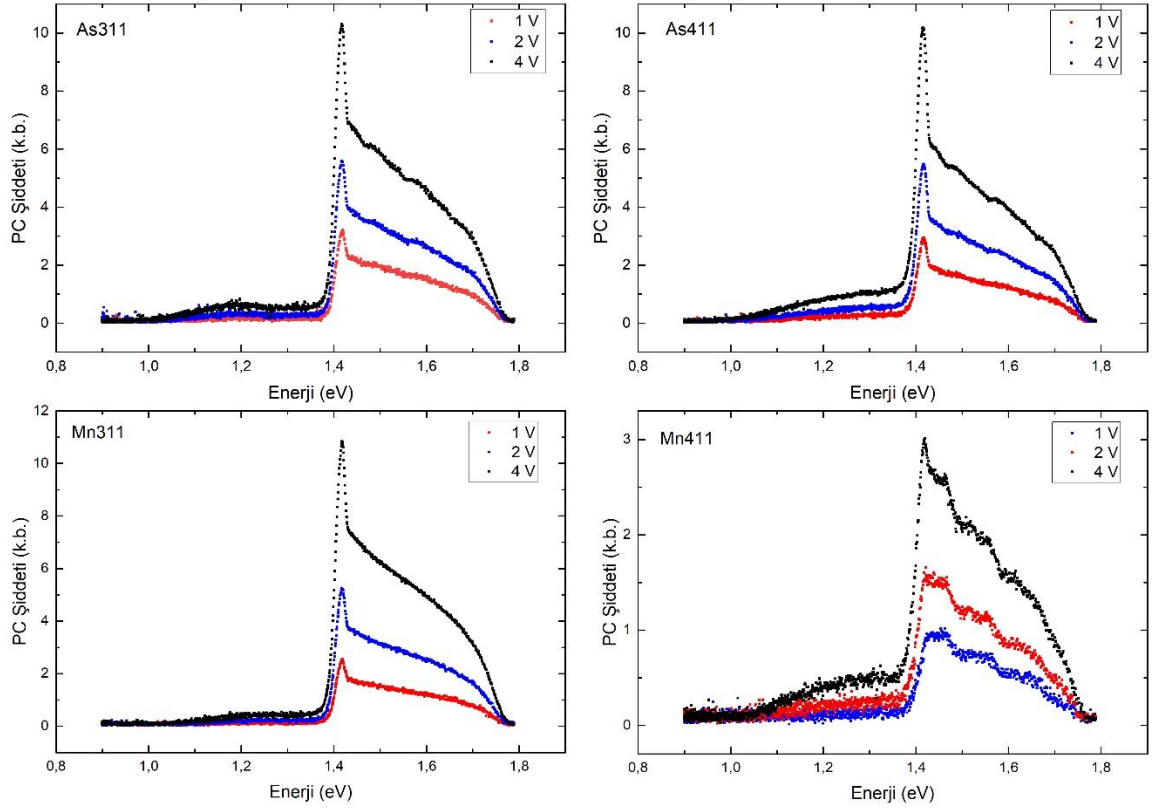
Tablo 4.2: PR spektrumundan GaMnAs/AlAs örnekleri için belirlenen optik geçiş enerjileri.

Örnek	Loc.	GaAs	ME-1	ME-2	ME-3	ME-4	ME-5
Mn100	-	1.428	1.437	1.457	1.513	1.628	1.770
Mn110	-	1.428	-	-	1.597	-	1.780
Mn311	1.398	1.429	1.447	1.467	1.563	-	1.771
Mn411	1.394	1.431	-	1.461	1.591	-	1.795

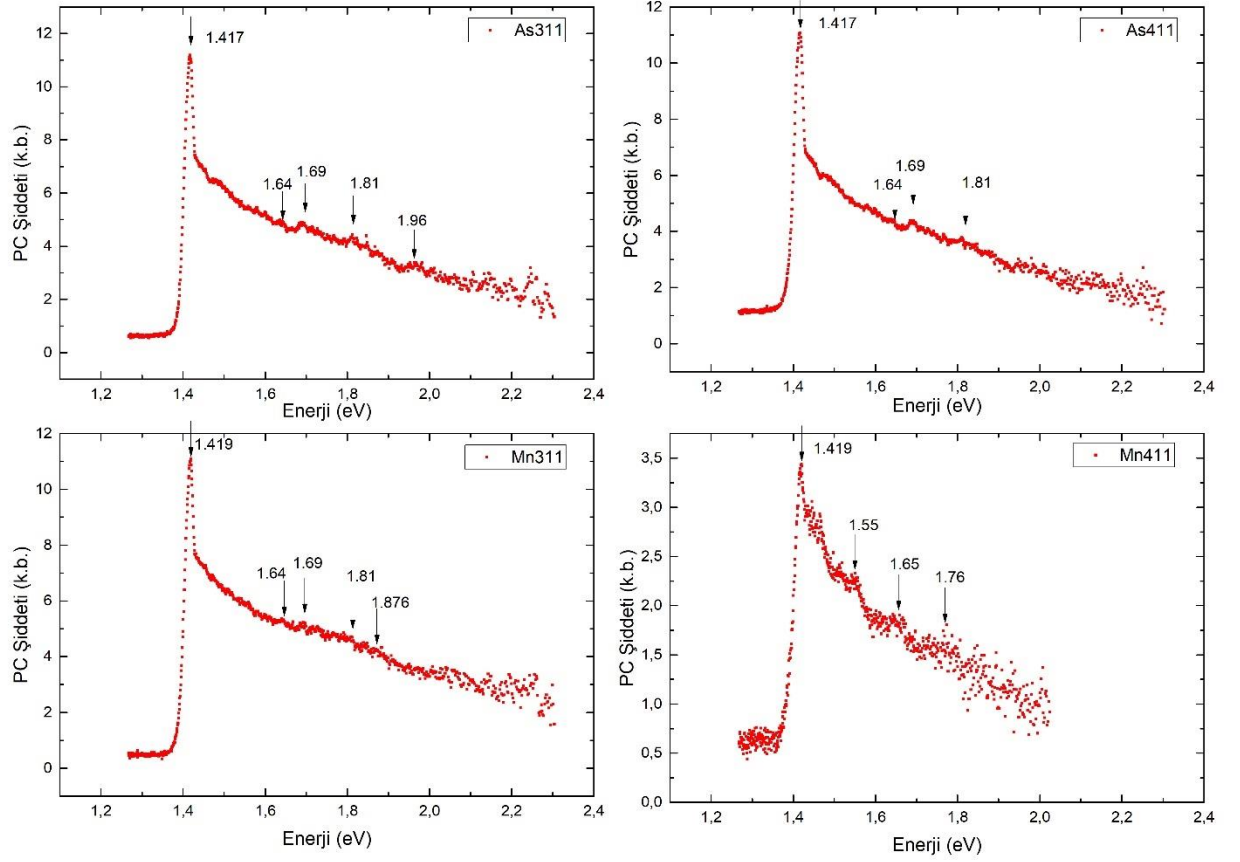
4.2. FOTOİLETKENLİK SONUÇLARI

Tüm örnekler için yapılan ölçümlerde uyarım kaynağının şiddeti sabit tutuldu ve alınan tüm spektrumlarda monokromatörün yarık (slit) genişlikleri 1 mm'ye ayarlandı. Şekil 4.3'de Mn'sız ve Mn'lı örnekler sırasıyla 1 V, 2 V ve 4 V besleme voltajı uygulayarak PC sepektrumu elde edildi.

Şekil 4.4'de (311)B ve (411)B yönelimlerdeki Mn'sız GaAs/AlAs ve Mn'lı $\text{Ga}_{0.999}\text{Mn}_{0.001}\text{As}/\text{AlAs}$ örnekler için normalize edilmiş spektrumlar verilmiştir. Spektrumlardan belirlenen optik geçiş enerjileri, Tablo 4.3'de verilmiştir.



Şekil 4.3: a) (311)B ve b) (411)B yönelimlerindeki GaAs/AlAs örneklerin ve c) (311)B ve d) (411)B yönelimlerindeki GaMnAs/AlAs örneklerin PC spektrumu.



Şekil 4.4: a) (311)B ve b) (411)B yönelimlerdeki GaAs/AlAs örneklerin ve c) (311)B ve d) (411)B yönelimlerdeki GaMnAs/AlAs örneklerin normalize edilmiş PC spektrumu.

Tablo 4.3: PC spektrumundan (311) ve (411) doğrultularındaki Mn'sız örnekler için elde edilen optik geçiş enerji seviyeleri.

Örnek	Loc.	AE-1	AE-2	AE-3	AE-4
As311	1.417	1.642	1.690	1.812	1.96
As411	1.417	1.644	1.691	1.813	--

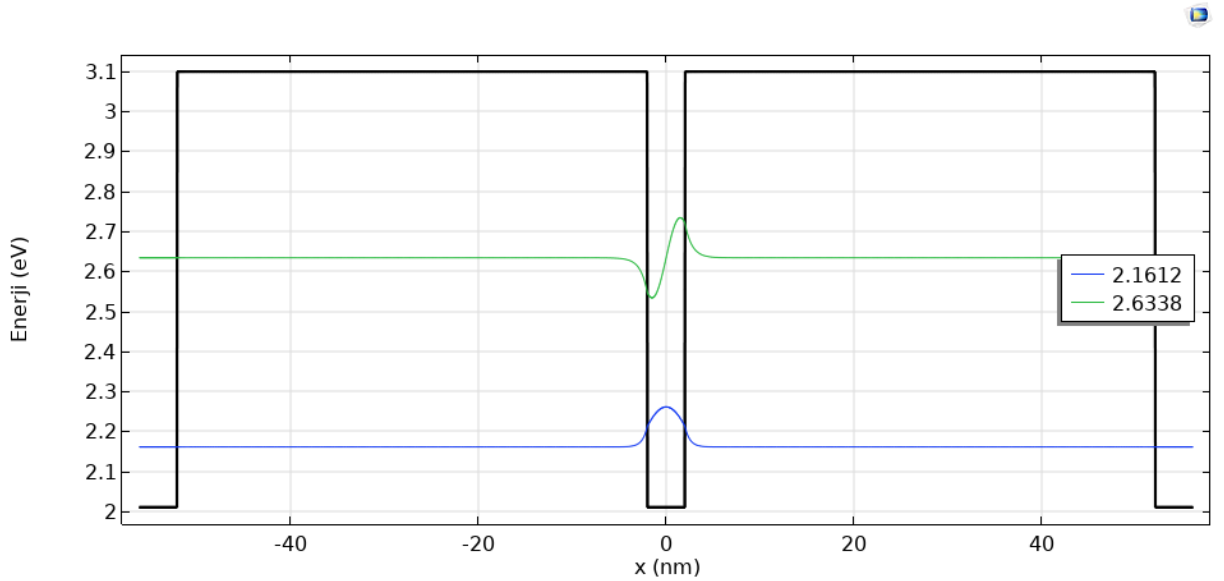
Tablo 4.4: PC spektrumundan (311) ve (411) doğrultularındaki Mn'lı örnekler için elde edilen optik geçiş enerji seviyeleri.

Örnek	Loc.	ME-1	ME-2	ME-3	ME-4
Mn311	1.419	1.64	1.696	1.810	1.876
Mn411	1.419	1.55	1.65	--	1.766

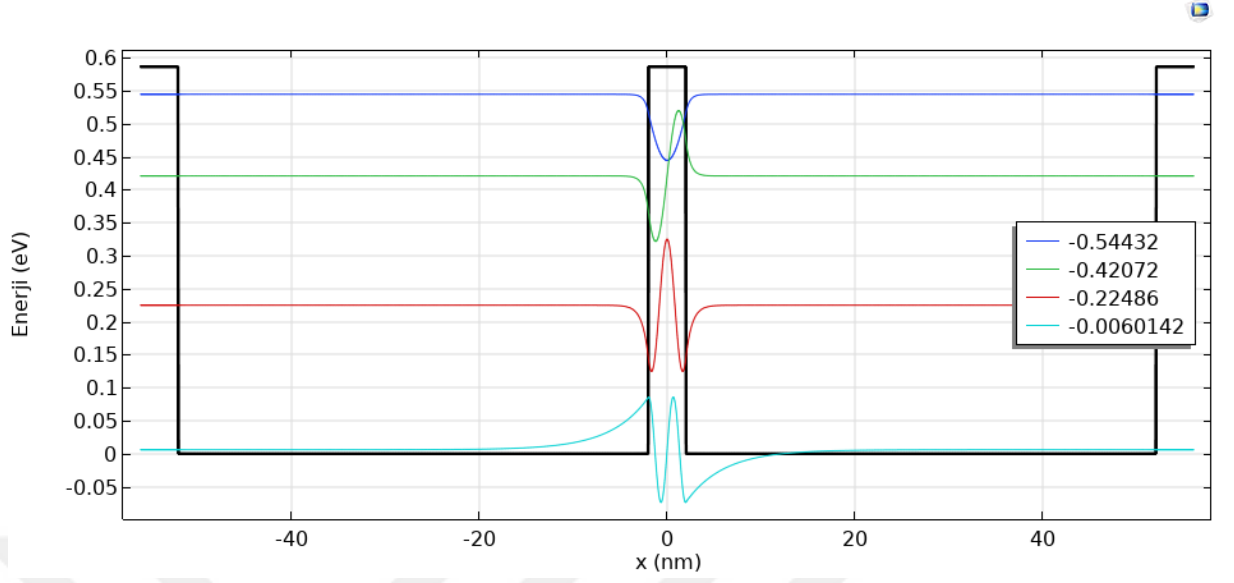
4.3. KURAMSAL HESAPLAMA SONUÇLARI

Genel bilgiler bölümünde verilen bilgilerden yararlanılarak hesaplanan (100) doğrultusundaki GaAs/AlAs örneğinin en düşük enerjili geçişi için elde edilen sonuçlar Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de verilmiştir. Benzer şekilde diğer vadiler için de optik geçiş enerjilerinin hesaplamaları yapılmıştır. Şekillerde iletkenlik, valans bandı ağır ve hafif boşluk bandına ait bant düzenlenmesi ve herbir bant için dalga fonksiyonları ayrı ayrı verilmiştir. Kuantum kuyusu katmanının genişliğinin dar olması nedeniyle, iletkenlik bandında 2. kuantize enerji seviyesi bariyer katmanı enerji değerine yakın olduğu için elektronlar tamamen bağlı durum olarak davranmamaktadır.

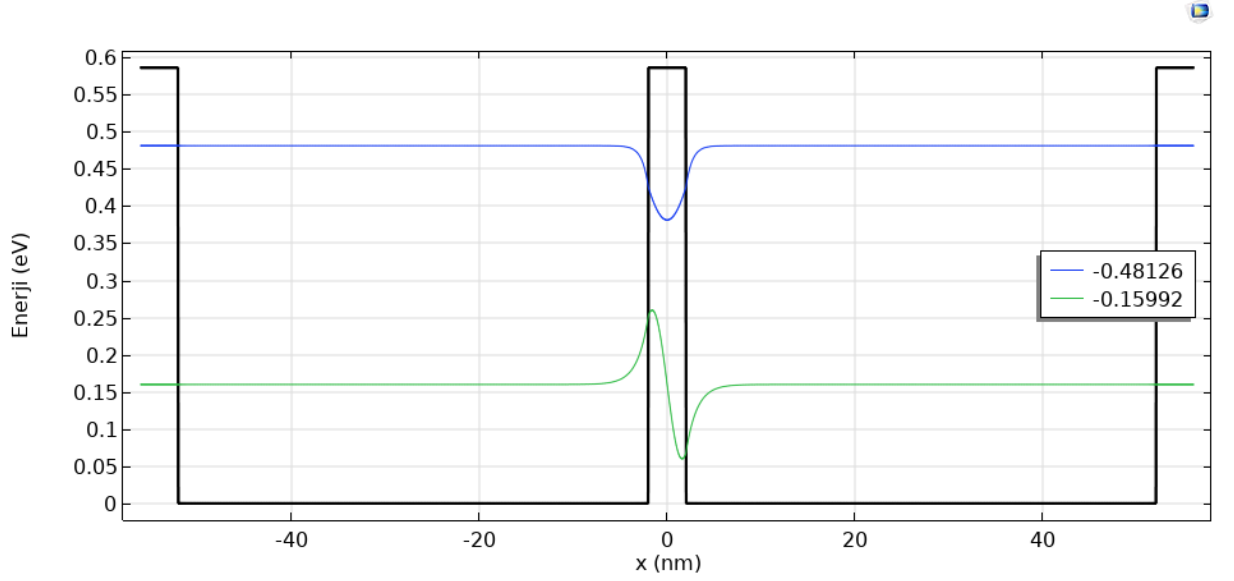
Valans bandında ağır boşluğun etkin kütlesinin büyük olması nedeniyle 3. adet kuantize enerji seviyesi oluşmaktadır. Hafif boşluğun etkin kütlesinin ağır boşluğa göre daha küçük olması nedeniyle 2 tane kuantize enerji seviyesi oluşmaktadır.



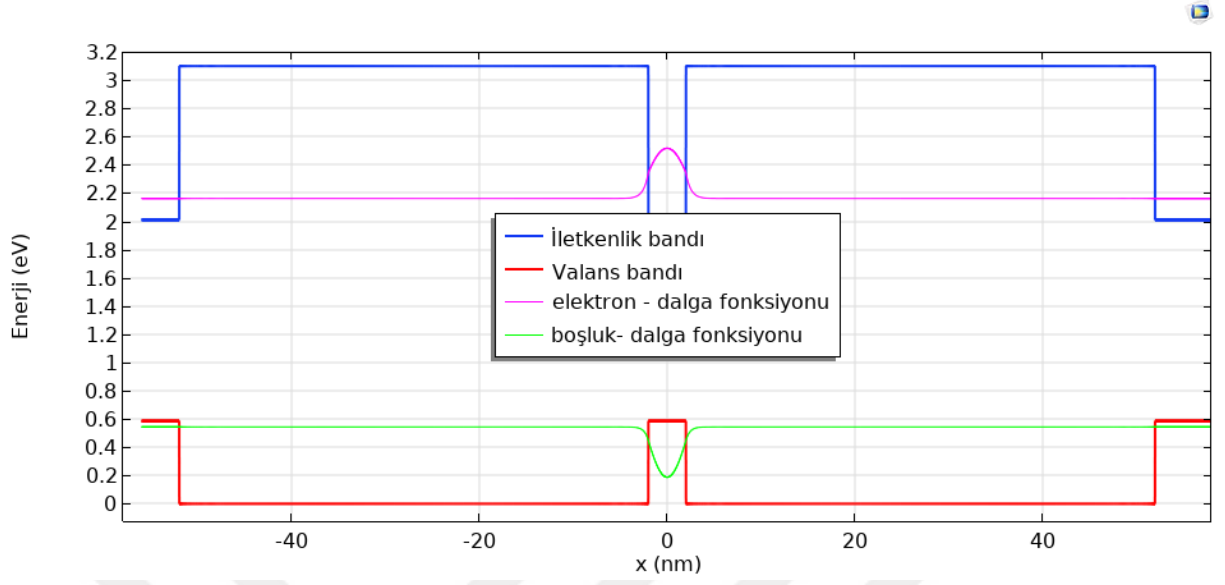
Şekil 4.5: (100) doğrultusundaki GaAs/AlAs kuantum kuyulu yapının iletkenlik bandı düzenlenmesi. Sırasıyla, mavi ve yeşil renk 1. ve 2. kuantize enerji seviyesinin dalga fonksiyonlarını göstermektedir. Herbir dalga fonksiyonunun konumu, enerji özdeğerine göre çizdirilmiştir.



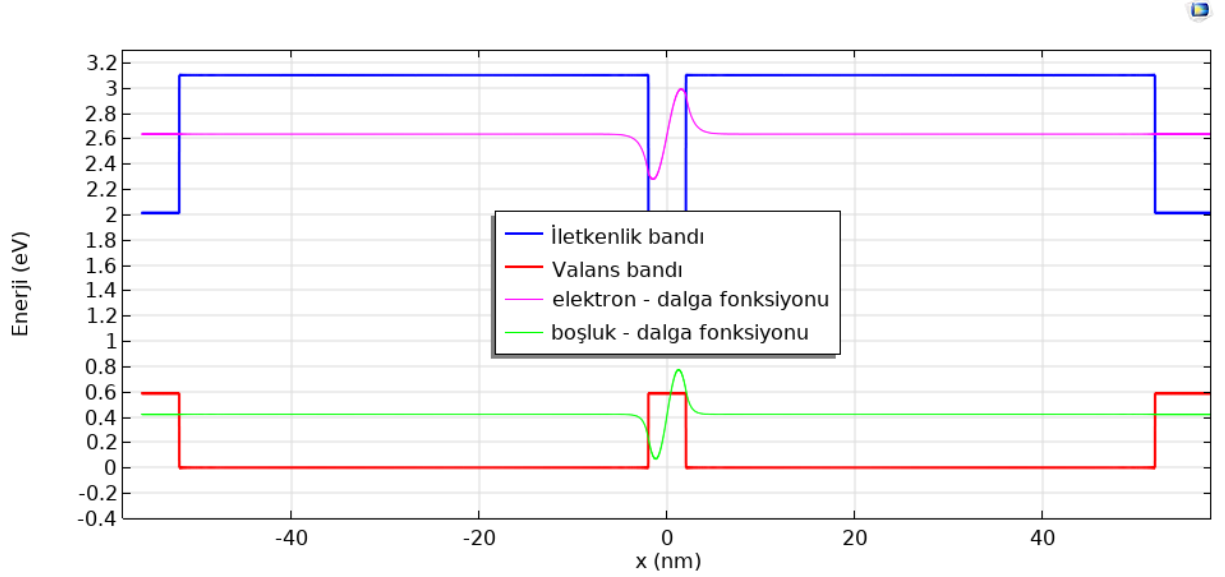
Şekil 4.6: (100) doğrultusundaki GaAs/AlAs kuantum kuyulu yapının ağır boşluk için valans bandı düzenlenmesi. Sırasıyla, mavi, yeşil, kırmızı ve turkuaz renk 1., 2., 3. ve 4. kuantize enerji seviyesinin dalga fonksiyonlarını göstermektedir. Herbir dalga fonksiyonunun konumu, enerji özdeğerine göre çizdirilmiştir.



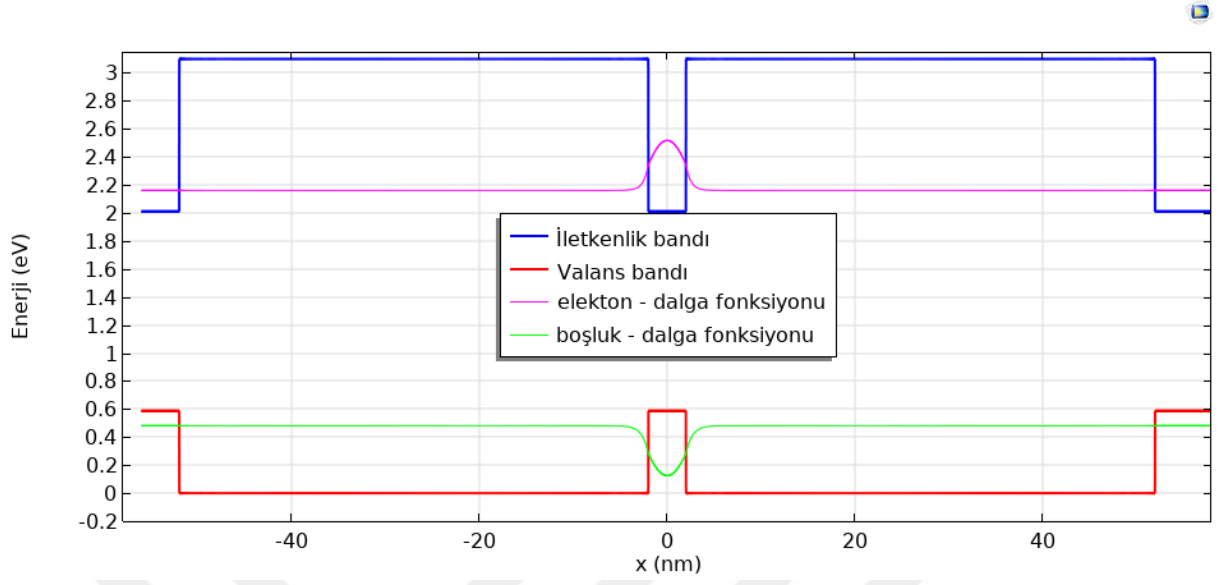
Şekil 4.7: (100) doğrultusundaki GaAs/AlAs kuantum kuyulu yapının hafif boşluk için Valans bandı düzenlenmesi. Sırasıyla, mavi ve yeşil renk 1. ve 2. kuantize enerji seviyesinin dalga fonksiyonlarını göstermektedir. Herbir dalga fonksiyonunun konumu, enerji özdeğerine göre çizdirilmiştir.



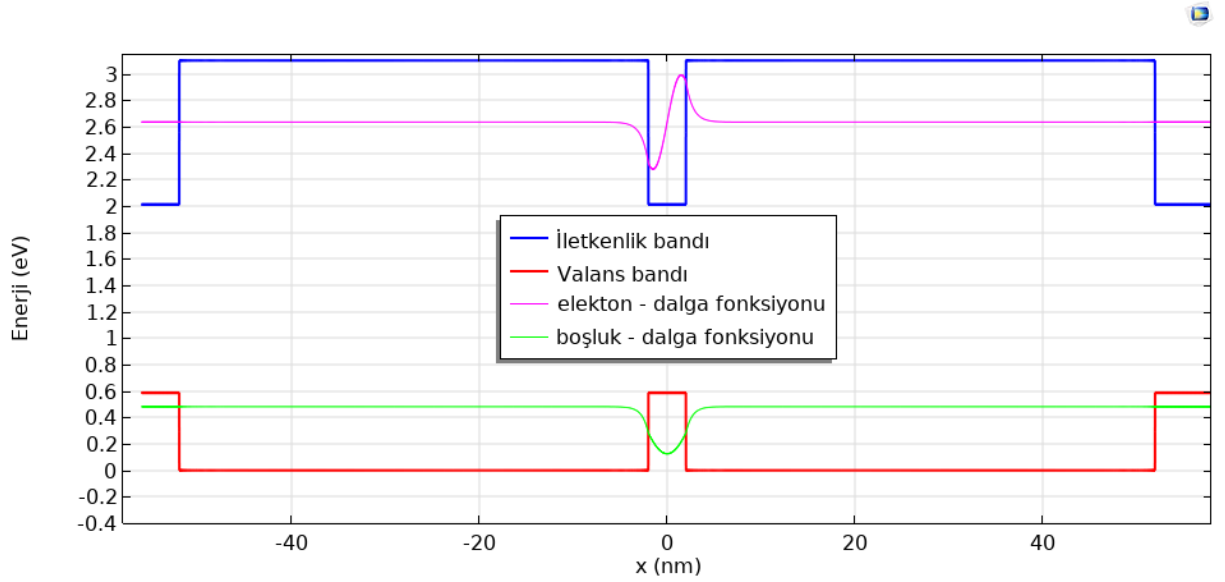
Şekil 4.8: (100) doğrultusundaki GaAs/AlAs kuantum kuyulu yapının iletkenlik bandı ve ağır boşluk için valans bandı düzenlenmesi. E_{e1} (pembe) ve E_{hh1} (yeşil) 1. kuantize seviyesi için elektron ve ağır boşlukların dalga fonksiyonları. Herbir dalga fonksiyonunun konumu, enerji özdeğerine göre çizdirilmiştir.



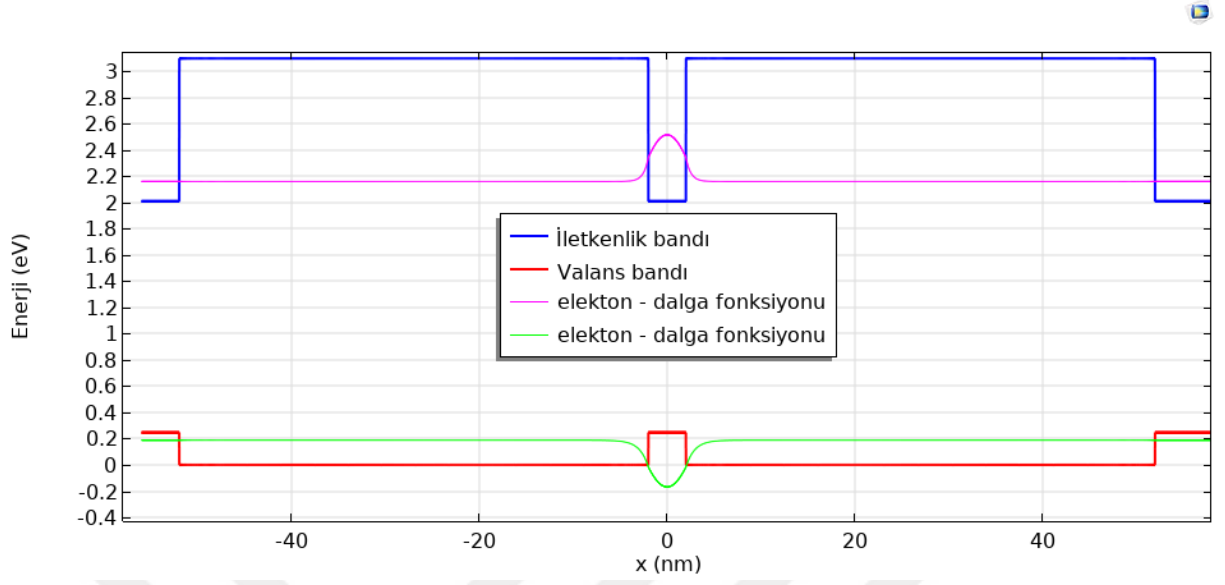
Şekil 4.9: (100) doğrultusundaki GaAs/AlAs kuantum kuyulu yapının iletkenlik bandı ve ağır boşluk için valans bandı düzenlenmesi. E_{e2} (pembe) ve E_{hh2} (yeşil) 2. kuantize seviyesi için elektron ve ağır boşlukların dalga fonksiyonları. Herbir dalga fonksiyonunun konumu, enerji özdeğerine göre çizdirilmiştir.



Şekil 4.10: (100) doğrultusundaki GaAs/AlAs kuantum kuyulu yapının iletkenlik bandı ve hafif boşluk için valans bandı düzenlenmesi. E_{e1} (pembe) ve E_{hh1} (yeşil) 1. kuantize seviyesi için elektron ve hafif boşlukların dalga fonksiyonları. Herbir dalga fonksiyonunun konumu, enerji özdeğerine göre çizdirilmiştir.



Şekil 4.11: (100) doğrultusundaki GaAs/AlAs kuantum kuyulu yapının iletkenlik bandı ve hafif boşluk için valans bandı düzenlenmesi. E_{e2} (pembe) ve E_{hh2} (yeşil) 2. kuantize seviyesi için elektron ve ağır boşlukların dalga fonksiyonları. Herbir dalga fonksiyonunun konumu, enerji özdeğerine göre çizdirilmiştir.



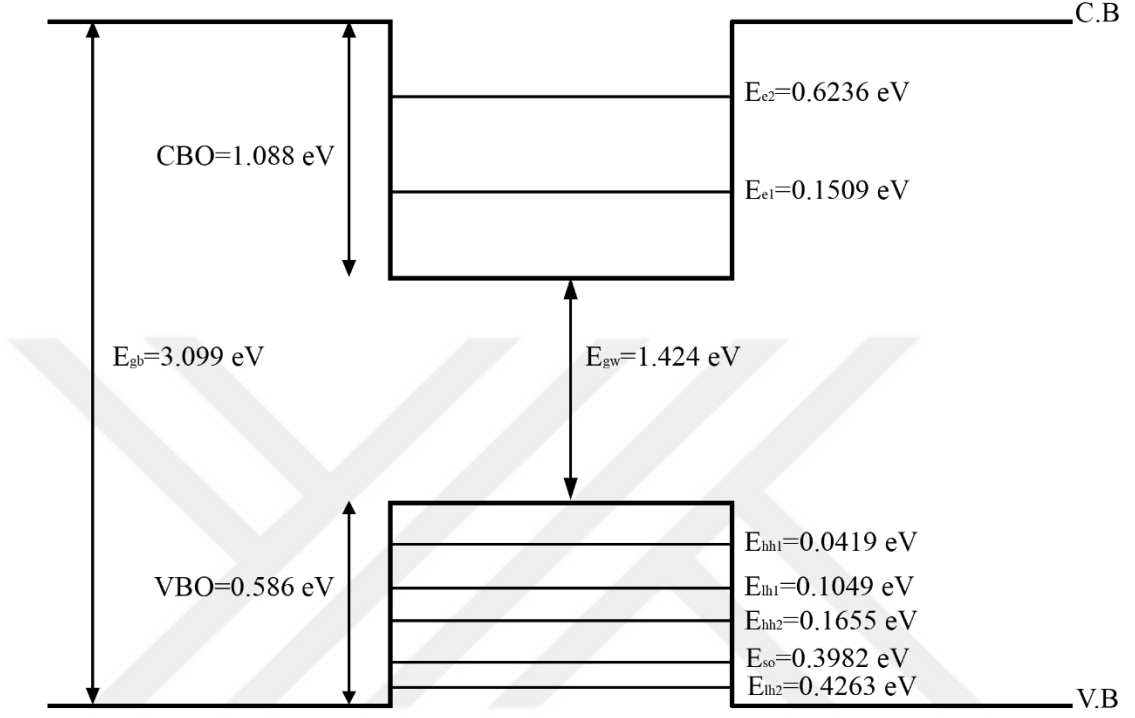
Şekil 4.12: (100) doğrultusundaki GaAs/AlAs kuantum kuyulu yapının iletkenlik bandı ve spin orbit bandı düzenlenmesi. E_{e2} (pembe) ve E_{hh2} (yeşil) 2. kuantize seviyesi için elektron ve boşlukların dalga fonksiyonları. Herbir dalga fonsiyonunun konumu, enerji özdeğerine göre çizdirilmiştir.

Optik geçiş enerjileri, bulk GaAs veya GaMnAs band aralığı enerji, CB ve VB kuantize enerji seviyelerinin toplamından elde edilmiştir. Optik enerjileri,

$$E_{tr} = E_{gw} + E_e + E_h \quad (4.1)$$

Denklem 4.1'den yararlanarak hesaplanmıştır.

Genel olarak GaAs/AlAs kuantum kuyusu için geçiş enerji seviyelerini Şekil 4.11'deki gibi gösterebiliriz.



Şekil 4.13: (100) doğrultudaki GaAs/AlAs kuantum kuyulu örneğin geçiş enerji seviyeleri.

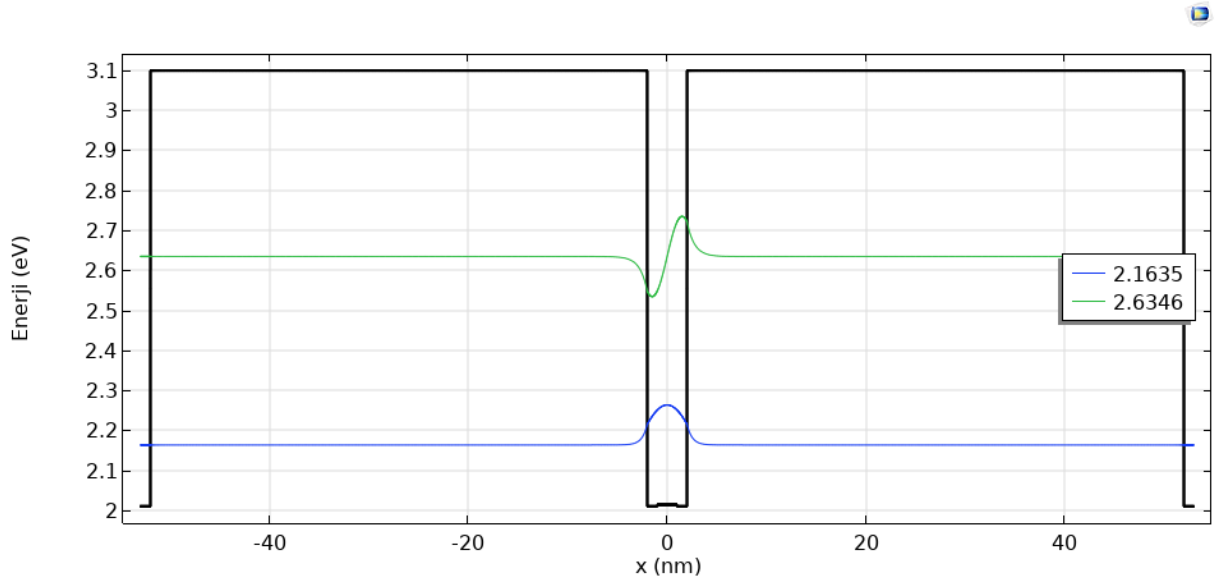
Tablo 4.5: (100), (110), (311) ve (411) doğrultularındaki GaAs (Γ)/AlAs (Γ) örneklerin geçiş enerji seviyesi.

Örnek	E_{bariyer}	$E_G(\text{Bulk})$	$E_{hh1}-E_{e1}$	$E_{hh2}-E_{e2}$	$E_{lh1}-E_{e1}$	$E_{lh2}-E_{e2}$	$E_{so}-E_{e1}$
As100	3.099	1.424	1.617	2.213	1.679	2.474	1.973
As110	3.099	1.424	1.599	2.145	1.689	2.499	1.971
As311	3.099	1.424	1.597	2.138	1.691	2.503	1.973
As411	3.099	1.424	1.597	2.137	1.699	2.514	1.973

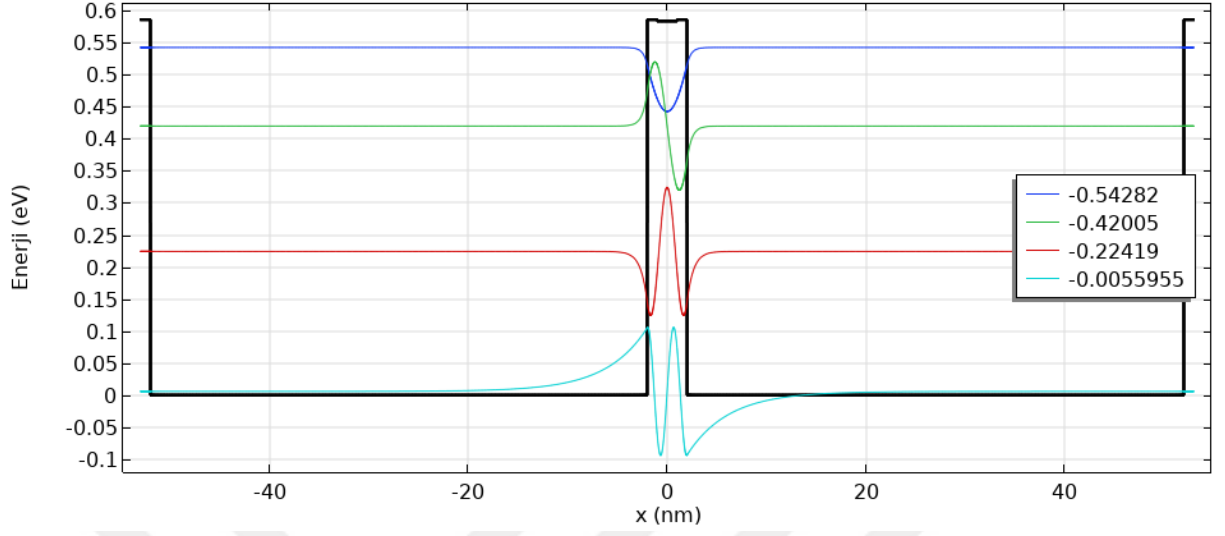
Benzer şekilde, Genel bilgiler kısmında verilen bilgilerden yararlanarak, Mn içeren (100), (110), (311) ve (411) doğrultularındaki GaMnAs/AlAs alaşımlar için band düzenlenmesi hesaplanmıştır. Band düzenlenmesine göre enerji özdeğerleri ve dalga öz fonksiyonları hesaplanmıştır. Aşağıda (100) GaMnAs/AlAs örneği için yapılan hesaplamalar ayrıntılı bir şekilde verilmektedir.

GaAs kuantum kuyusunun iletkenlik bant ve valans bant süreksizlik değerleri GaAs/AlAs örneklerinde kullanılan değerler ile aynıdır. GaMnAs kuyusunun iletkenlik bant ve valans bant süreksizlik değeri 65:35 ayırım olacak şekilde alınmıştır.

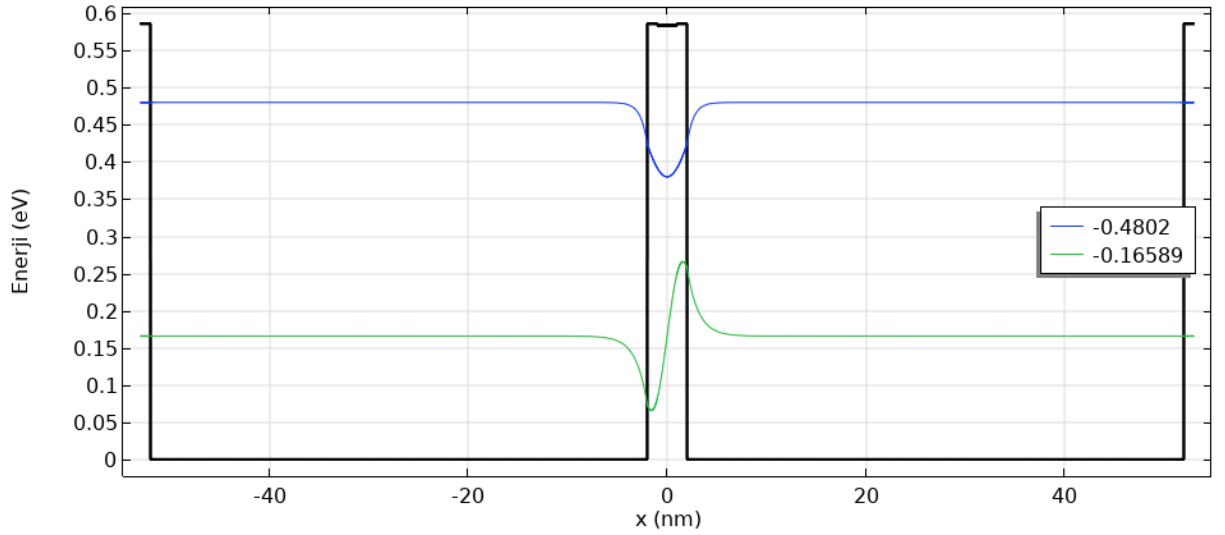
Genel bilgiler bölümünde verilen bilgilerden yararlanılarak hesaplanan (100) doğrultusundaki GaMnAs/AlAs örneği için elde edilen sonuçlar Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’de verilmiştir. Şekillerde iletkenlik, valans bandı ağır ve hafif boşluk bandına ait bant düzenlenmesi ve herbir bant için dalga fonksiyonları ayrı ayrı verilmiştir. Farklı doğrultularda büyütülmüş GaMnAs’in bant aralığı değerleri Tablo 4.7’de verilmiştir.



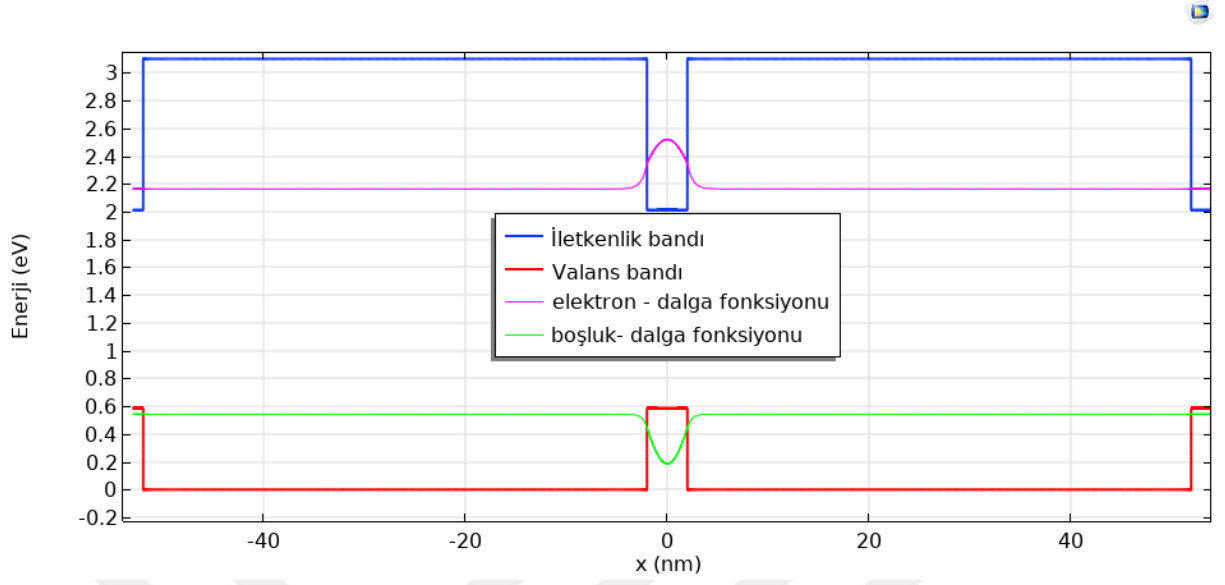
Şekil 4.14: (100) doğrultusundaki GaMnAs/AlAs kuantum kuyulu yapının iletkenlik bantı düzenlenmesi. Sırasıyla, mavi ve yeşil renk 1. ve 2. kuantize enerji seviyesinin dalga fonksiyonlarını göstermektedir. Herbir dalga fonksiyonunun konumu, enerji özdeğerine göre çizdirilmiştir.



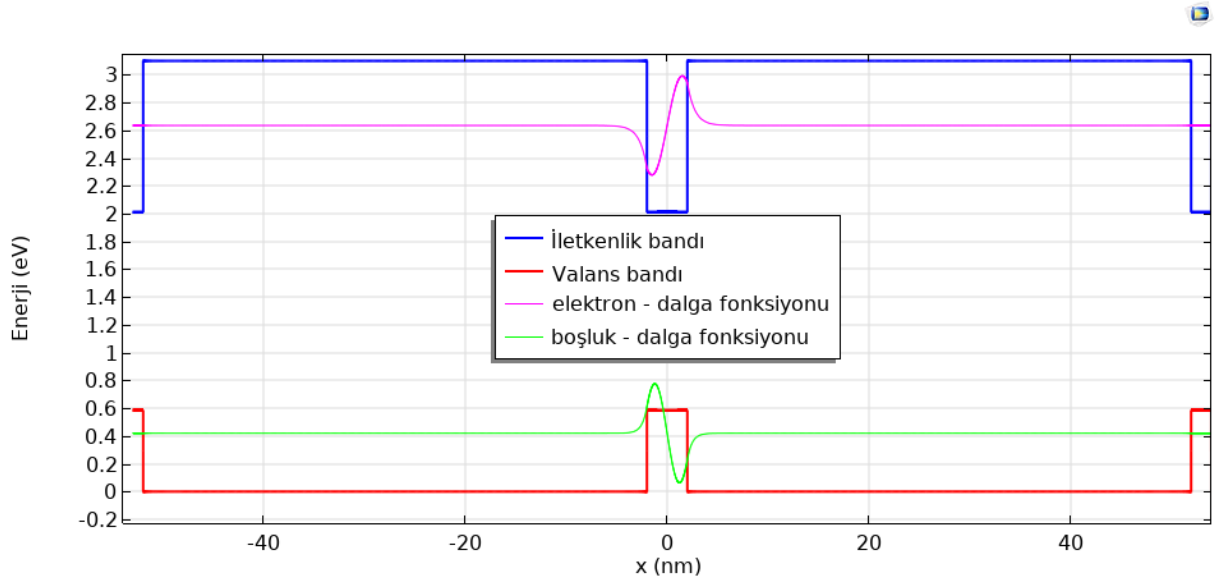
Şekil 4.15: (100) doğrultusundaki GaMnAs/AlAs kuantum kuyulu yapının ağır boşluk için valans bandı düzenlenmesi. Sırasıyla, mavi, yeşil, kırmızı ve turkuaz renk 1., 2., 3. ve 4. kuantize enerji seviyesinin dalga fonksiyonlarını göstermektedir. Herbir dalga fonksiyonunun konumu, enerji özdeğerine göre çizdirilmiştir.



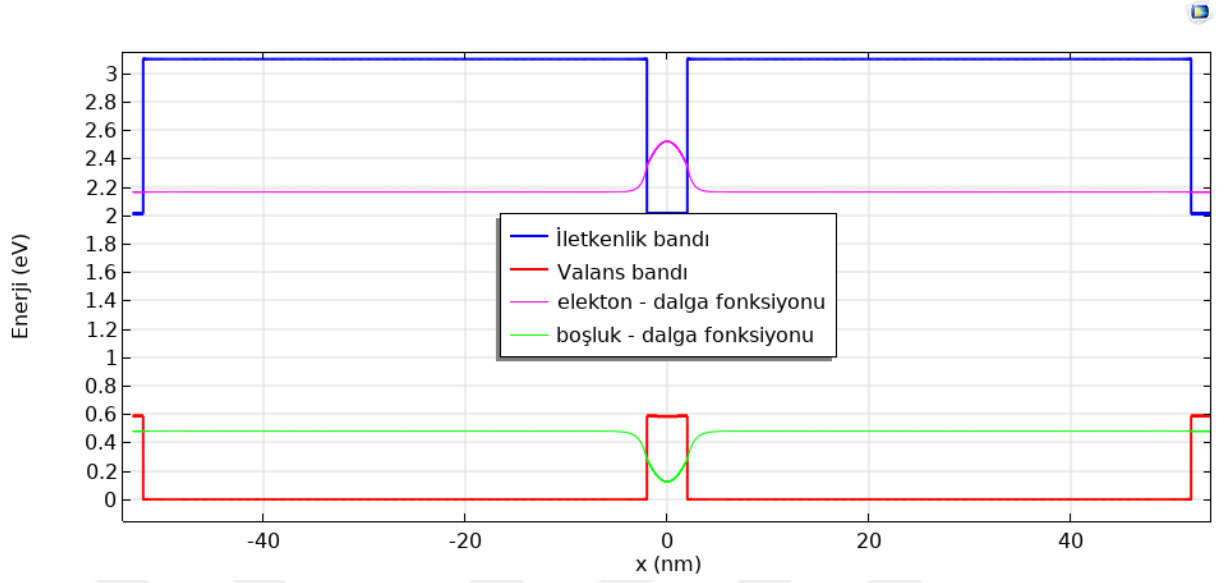
Şekil 4.16: (100) doğrultusundaki GaMnAs/AlAs kuantum kuyulu yapının hafif boşluk için Valans bandı düzenlenmesi. Sırasıyla mavi ve yeşil renk 1. ve 2. kuantize enerji seviyesinin dalga fonksiyonunu göstermektedir. Dalga fonksiyonunun konumu, enerji özdeğerine göre çizdirilmiştir.



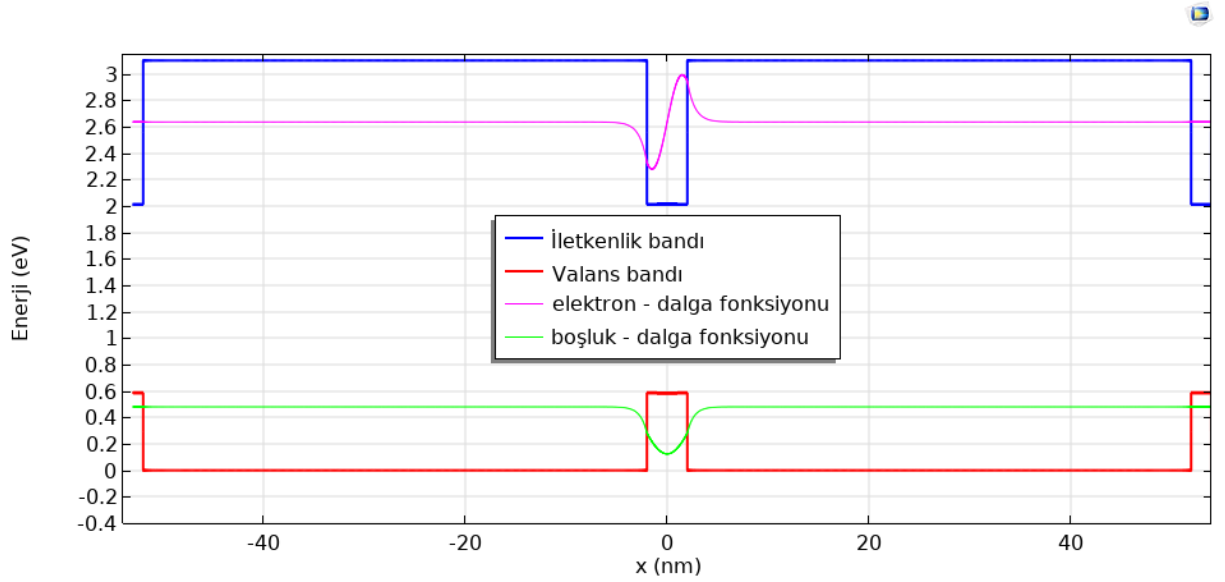
Şekil 4.17: (100) doğrultusundaki GaMnAs/AlAs kuantum kuyulu yapının iletkenlik bandı ve ağır boşluk için valans bandı düzenlenmesi. E_{e1} (pembe) ve E_{hh1} (yeşil) 1. kuantize seviyesi için elektron ve ağır boşlukların dalga fonksiyonları. Herbir dalga fonksiyonunun konumu, enerji özdeğerine göre çizdirilmiştir.



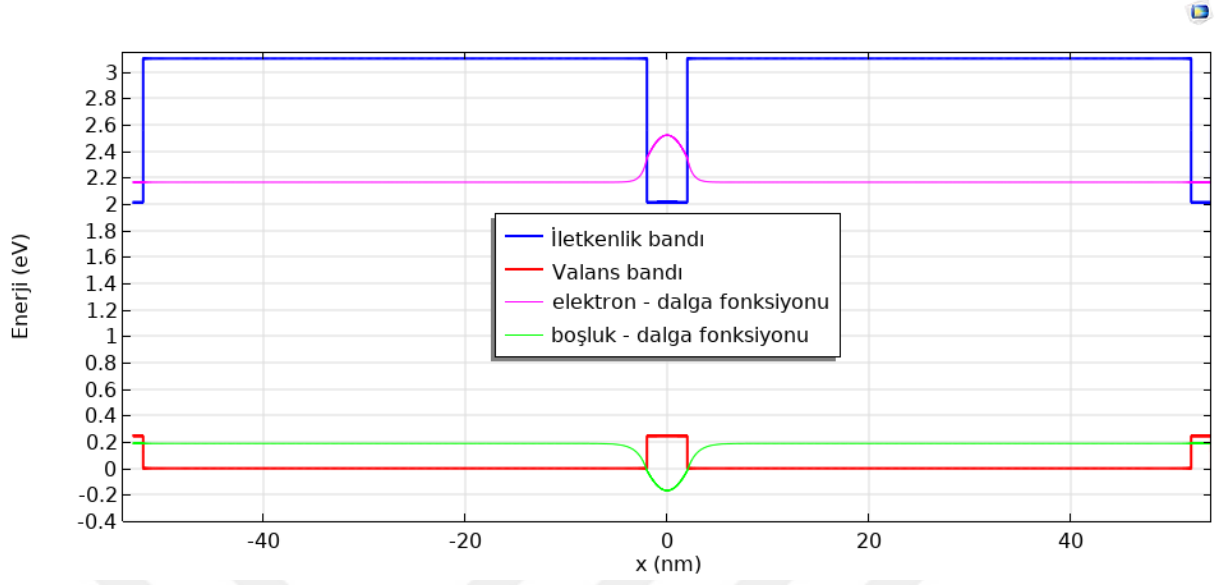
Şekil 4.18: (100) doğrultusundaki GaMnAs/AlAs kuantum kuyulu yapının iletkenlik bandı ve ağır boşluk için valans bandı düzenlenmesi. E_{e1} (pembe) ve E_{lh1} (yeşil) 1. kuantize seviyesi için elektron ve ağır boşlukların dalga fonksiyonları. Herbir dalga fonksiyonunun konumu, enerji özdeğerine göre çizdirilmiştir.



Şekil 4.19: (100) doğrultusundaki GaMnAs/AlAs kuantum kuyulu yapının iletkenlik bandı ve hafif boşluk için valans bandı düzenlenmesi. E_{e1} (pembe) ve E_{s0} (yeşil) 1. kuantize seviyesi için elektron ve hafif boşlukların dalga fonksiyonları. Herbir dalga fonksiyonunun konumu, enerji özdeğerine göre çizdirilmiştir.

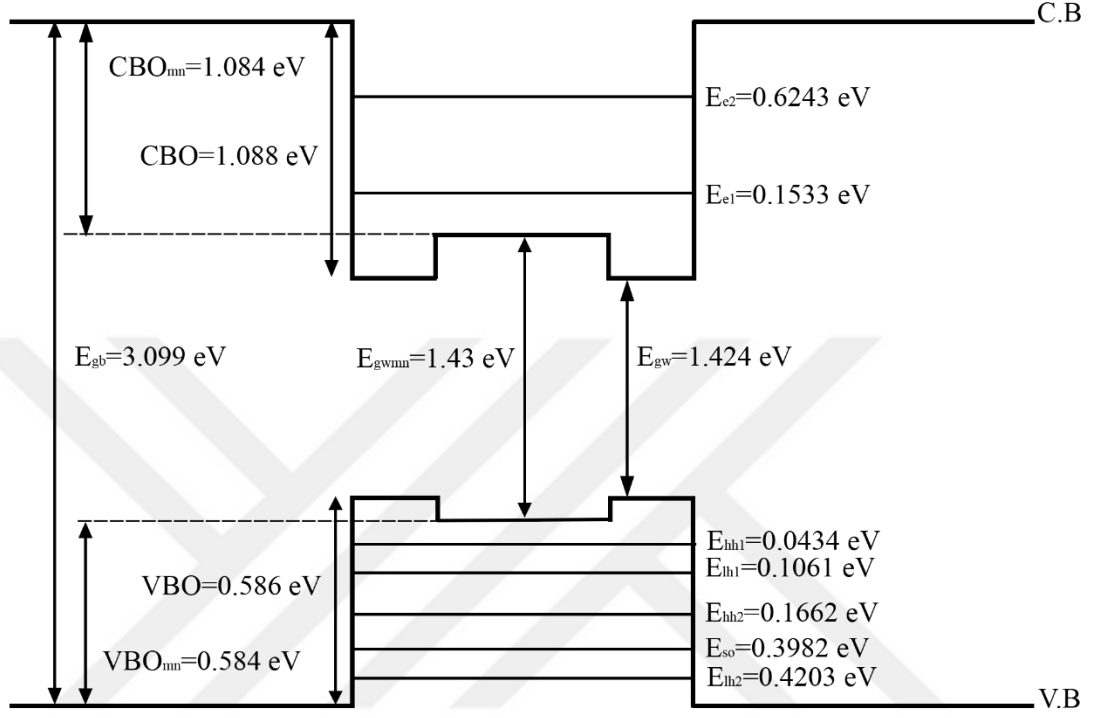


Şekil 4.20: (100) doğrultusundaki GaMnAs/AlAs kuantum kuyulu yapının iletkenlik bandı ve hafif boşluk için valans bandı düzenlenmesi. E_{e1} (pembe) ve E_{lh1} (yeşil) 1. kuantize seviyesi için elektron ve ağır boşlukların dalga fonksiyonları. Herbir dalga fonksiyonunun konumu, enerji özdeğerine göre çizdirilmiştir.



Şekil 4.21: (100) doğrultusundaki GaAs/AlAs kuantum kuyulu yapının iletkenlik bandı ve spin orbit bandı düzenlenmesi. E_{e2} (pembe) ve E_{hh2} (yeşil) 2. kuantize seviyesi için elektron ve boşlukların dalga fonksiyonları. Herbir dalga fonksiyonunun konumu, enerji özdeğerine göre çizdirilmiştir

Genel olarak GaMnAs/AlAs kuantum kuyusu için geçiş enerji seviyelerini Şekil 4.11'deki gibi gösterebiliriz.



Şekil 4.22: (100) doğrultudaki GaMnAs/AlAs kuantum kuyulu örneğin geçiş enerji seviyeleri.

Tablo 4.6: (100), (110), (311) ve (411) doğrultularındaki GaMnAs (Γ)/AlAs (Γ) örneklerin optik geçiş enerjileri.

Örnek	E_{bariyer}	$E_G(\text{Bulk})$	E_{Gmn}	$E_{hh1}-E_{e1}$	$E_{hh2}-E_{e2}$	$E_{lh1}-E_{e1}$	$E_{lh2}-E_{e2}$	$E_{so}-E_{e1}$
Mn100	3.099	1.424	1.43	1.621	2.214	1.6833	2.469	1.975
Mn110	3.099	1.424	1.43	1.605	2.183	1.6919	2.479	1.973
Mn311	3.099	1.424	1.43	1.604	2.196	1.6942	2.482	1.975
Mn411	3.099	1.424	1.43	1.604	2.196	1.6942	2.482	1.975

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu bölümde, Bulgular Bölümü'nde analiz edilmeden verilen PR ve PC sonuçları, kuramsal hesaplamalardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırarak değerlendirilecektir. Kuramsal hesaplamalar bant kenarı enerjileri kullanılarak hesaplanmış olup, bant kenarı enerjilerinden daha düşük enerjide olan yerel enerji seviyeleri hesaplamalara dahil edilmemiştir. Hesaplamalara dahil edilmeyen yerel enerji seviye etkileri, literatürdeki çalışmalardan yararlanarak sonuçların analiz edilmesi ve yorumlanmasında yararlanılmıştır.

Oda sıcaklığında yapılan Hall olayı ölçümlerinde örnekler içerisinde yeterli serbest taşıyıcıların olmaması nedeniyle anlamlı (sinyal/gürültü oranı çok küçük) Hall voltajı ölçülememiştir. Benzer sonuç düşük sıcaklıklarda da gözlenmiştir. Buradan, örneğin yapısal kusurlar nedeniyle kompanse olduğu ve bundan dolayı ferromanyetik özellik göstermediği anlaşılmıştır [71].

AlAs/GaAs örneğine ait Şekil 4.1'in analizinden elde edilen optik geçiş enerjileri Tablo 4.1'de verilmiştir. Tablo 4.1'de, (100) ve (110) kristal yönelimlerine sahip örneklerde GaAs'in bant aralığından (1.424 eV) daha düşük optik geçiş enerjisine sahip yerel seviyelerin var olmadığı/tespit edilemediği (Loc. sütünü) ve (311) ve (411) yönelimli örneklerde yerel seviyelerin var olduğu görülmektedir. Mn'sız örnekler, AlAs/GaAs, 450 °C'de büyütülmüş olup bu sıcaklık değeri, (100) GaAs'in MBE yönteminde optimum büyütme sıcaklık (580-620 °C) değerinden düşüktür. Optimum sıcaklık değerinden daha düşük sıcaklıklarda GaAs'in büyütülmesi, sığ ve derin seviye kusurlarının oluşmasına neden olduğu bilinmektedir [72, 73]. Bu yapısal kusurların yoğunluğu, optimum büyütme sıcaklığından uzaklaştıkça artmaktadır. Bu tür davranışa sahip olan ve hemen hemen tüm düşük sıcaklık şartlarında büyütmede ortaya çıkan As'in Ga atomu yerine geçmesi (As_{Ga} ; EL2) kusurudur. Bu kusur bant aralığı ortasında yer almaktadır. Bu nedenle, Tablo 4.1'de verilen ve bant aralığından en fazla ~50 meV küçük olan kusurların As_{Ga} kusuru olmayacağı, farklı sığ seviye kusurlardan kaynaklanmış olabileceği değerlendirilmiştir. Bu kusur tipleri bu çalışmada kullanılan tekniklerle belirlenememektedir. Bu kusurların sadece iki farklı kristal yöneliminde gözlenmesi, diğer kristal yönelimlerinde olmadığı anlamına gelmemektedir; yani ölçülebilecek kadar yüksek yoğunlukta olmadığı söylenebilir. Benzer şekilde yerel seviyelerin varlığı Şekil 4.4'te verilen PC spektrumlarında da görülmektedir. Bu spektrumlarda en göze çarpan husus optik geçiş enerjisinin ~1.417 eV değerlerinde keskin (eksitonığimsi) pik yapmasıdır. Bu pikin genliği çok

yüksek olduğundan dolayı kendisinden küçük enerjili geçiş(ler)e ait geniş pik(ler)i bastırmıştır. Bu geçişler Tablo 5.1’de lokalize seviye-bant kenarı optik geçişine karşılık gelen geçiş olduğunu belirtmek için “Kusur” olarak kısaca adlandırılmıştır.

Tablo 4.1’de GaAs olarak adlandırılan sütündaki enerji değerleri GaAs’ın iyi bilinen bant aralığı değerinden 5-8 meV daha büyüktür [12]. Bu örneklerde kuyu katmanını oluşturan GaAs düşük sıcaklıkta optimum büyütme sıcaklığından daha düşük sıcaklıkta büyütüldüğü için, düşük sıcaklıklarda büyütülen örneklerde gözlenen stokiometrinin sağlanamamasından dolayı daha yüksek enerjide optik geçiş gözlenmiş olabilir.

Tablo 5.1: GaAs/AlAs örnekler için PR deney sonuçlarına karşılık gelen kuramsal sonuçların olası optik geçiş enerjileri. Tabloda belirlenemeyen optik geçiş türleri soru işareti ile gösterilmiştir.

Örnek	AE-1	Geçiş Türü	AE-2	Geçiş Türü	AE-3	Geçiş Türü	AE-4	Geçiş Türü	AE-5	Geçiş Türü
As100	1.468	Kusur	1.513	Kusur	1.644	$E_{e1}-E_{hh1}$	1.690	$E_{e1}-E_{lh1}$	1.763	??
As110	1.473	Kusur	1.541	Kusur	1.622	$E_{e1}-E_{hh1}$	--	--	1.781	??
As311	1.458	Kusur	--	--	1.659	$E_{e1}-E_{hh1}$	--	--	1.756	??
As411	1.484	Kusur	--	--	1.622	$E_{e1}-E_{hh1}$	1.699	$E_{e1}-E_{lh1}$	1.765	??

Tablo 5.2: GaAs/AlAs örnekler için PC deney sonuçlarına karşılık gelen kuramsal sonuçların olası optik geçiş enerjileri. Tabloda belirlenemeyen optik geçiş türleri soru işareti ile gösterilmiştir.

Örnek	AE-1	Geçiş Türü	AE-2	Geçiş Türü	AE-3	Geçiş Türü	AE-4	Geçiş Türü
As311	1.64	$E_{e1}-E_{hh1}$	1.69	$E_{e1}-E_{lh1}$	1.81	??	1.96	??
As410	1.64	$E_{e1}-E_{hh1}$	1.69	$E_{e1}-E_{lh1}$	1.81	??	--	??

Tablo 4.1’de AE-1 olarak adlandırılan optik geçiş enerjileri, GaAs’e ait optik geçiş enerjisinden yaklaşık olarak ~ 30 meV daha büyüktür. Benzer şekilde, PC ölçümlerinde (Tablo 4.3) 1.5 eV’den küçük değerlerde optik geçiş gözlenmiştir. Bu örnekler için hesaplanan optik geçiş enerjileri ~ 1.55 eV’den başlamaktadır. Güneş ve diğ. (2015)’nin aynı örnek üzerinde yaptığı deneysel çalışmada, örneklerin optik geçiş enerjileri PL yöntemi ile ~ 1.6 eV’den büyük olduğu rapor edilmiştir. Rodrigues ve diğ. (2012) (100) yönelimli alttaş üzerine 450°C ’de büyütölmüş 6 nm genişliğinde GaAs kuantum kuyusu içeren AlAs/GaAs tek kuantum kuyusunun optik bant aralığını >1.6 eV olarak bulmuştur. Bu çalışmadaki örneklerin kuantum kuyusu genişliği, bu çalışmadakinden daha fazla olduğu için optik geçiş enerjisinin bu çalışmadakinden daha düşük olması beklenmektedir. Ayrıca, AlAs ile GaAs yarıiletkenlerinin örgü sabiti birbirine çok yakın olduğu için örgü uyumlu olarak değerlendirilir [11, 12, 74] . Bu çalışmalar gözönüne alındığında banttan-banda optik geçişlerin 1.6 eV’tan daha büyük enerjili olmasını ve bu enerjiden daha düşük enerjili geçişlerin yerel seviyelerin sürece dahil olması gerektirmektedir. Tablo 4.1’de AE-1 ile gösterilen geçişler hesaplanan optik bant aralığına karşılık gelen optik geçiş enerjisinden ~ 160 meV küçük ve tüm doğrultularda gözlenmiştir. Ancak, AE-2 ile gösterilen optik geçiş sadece (100) ve (110) yönelimli örneklerde gözlenmiştir ve hesaplanan optik geçiş enerjisinden yaklaşık olarak 80/130 meV’luk fark olduğu görölmektedir. Bu geçiş enerjileri literatürde yapılan çalışmalarla uyumlu olsa da [75] bu geçişlere sebep olan seviyelerin farklı deney yöntemleri ile araştırılması gerekmektedir.

Tablo 4.1’de verilen AE-3 enerjisi, Tablo 4.5’de verilen $E_{e1}-E_{hh1}$ geçişleri ile uyumlu olduğu görölmektedir. Bu nedenle bu geçişlerin kaynağı ilk kuantize enerji seviyeleri arasında gerçekleştiğini göstermektedir. Kuramsal optik geçiş enerjilerinin hesaplanmasında kristal yönelimine bağı bant aralığı enerjisi değişimi ihmal edilmiştir. Bu nedenle bu seviyelerin hesaplamalarına kristal yönelim etkisi dahi edilirse daha uyumlu sonuçlar elde edilebilir.

Tablo 4.1’de verilen AE-4 enerjisi, Tablo 4.5’de verilen $E_{e1}-E_{lh1}$ geçişleri ile uyumlu olduğu görölmektedir. Bu nedenle bu geçişlerin kaynağı ilk kuantize enerji seviyeleri arasında gerçekleştiğini göstermektedir. Bu optik geçişlerin (100) ve (411) yönelimli örneklerde gözlenmesi ve diğer örneklerde gözlenmemesi, bu örnek yapısında beklenen boşluk bantları için anizotropiden kaynaklanmış olabilir. Çünkü daha yüksek enerjide optik geçişler gözlenmiştir (Bakınız Tablo 4.1).

Tablo 4.1’de ve Tablo 4.3’te verilen diğer yüksek enerjili optik geçişler ile, izinli yüksek baş kuantum sayılı hesaplanmış olan izinli optik geçişler arasında ciddi fark vardır. Ancak, bu geçişler yüksek ağır boşluk kuantum sayılı izinsiz geçiş ile $E_{e1}-E_{hh2/3}$ geçişleri uyumlu olsa da bu geçişler Tablo 5.1 ve 5.2 açıkça belirtilmemiştir. Çünkü bu geçiş enerjileri GaAs valans bandındaki kuantize boşluk bantları-bariyer bölgesi X vadisi (bulk) arası optik geçiş enerjisine de yakın değerdedir [76].

Tablo 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4’de verilen AlAs/GaAs ve AlAs/GaMnAs örneklerine ait optik geçiş enerjilerinde, referans örneğinde gözlenen koruyucu katman GaAs bant aralığından daha düşük enerjide lokalize geçişlerin Mn’lı örneklerde de gözleendiği tespit edilmiştir. Bu durum, koruyucu katmanın her iki örnekte de ayı kalınlıkta ve büyütme şartlarında olduğu gözönüne alındığında Mn’nın GaAs içerisine katılmasının yerel enerji seviyelerinde ve GaAs optik geçiş enerjisinde önemli bir değişiklik olmadığını göstermektedir. Ayrıca bu örneklerde de kristal yönelimine bağlı olarak optik geçiş enerjisinde önemli bir kayma gözlenmemiştir. Mn’lı örneklere ait koruyucu katmanın bant aralığı enerjisi, referans örneğinkine ile aynıdır. Bu da Mn’nın kuantum kuyusu içerisine dahil olmasının koruyucu katmanın yapısal özellikleri üzerine etkisinin zayıf veya olmadığını göstermektedir.

Tablo 5.3: GaMnAs/AlAs örnekler için PR deney sonuçlarına karşılık gelen kuramsal sonuçların olası optik geçiş enerjileri. Tabloda belirlenemeyen optik geçiş türleri soru işareti ile gösterilmiştir.

Örnek	Me-1	Geçiş Türü	ME-1	Geçiş Türü	ME-3	Geçiş Türü	ME-4	Geçiş Türü	ME-5	Geçiş Türü
Mn100	1.437	Kusu r	1.457	Kusur	1.513	Kusur	1.628	$E_{e1}-E_{hh1}$	1.770	Kusur
Mn110	--	--	--	Kusur	1.597	$E_{e1}-E_{hh1}$	--	--	1.780	Kusur
Mn311	1.447	Kusu r	1.467	Kusur	1.563	$E_{e1}-E_{hh1}$	--	--	1.771	Kusur
Mn411	--	--	1.461	Kusur	1.591	$E_{e1}-E_{hh1}$	--	--	1.795	Kusur

Tablo 5.4: GaMnAs/AlAs örnekler için PC deney sonuçlarına karşılık gelen kuramsal sonuçların olası optik geçiş enerjileri. Tabloda belirlenemeyen optik geçiş türleri soru işareti ile gösterilmiştir.

Örnek	ME-1	Geçiş Türü	ME-2	Geçiş Türü	ME-3	Geçiş Türü	ME-4	Geçiş Türü
Mn311	1.64	$E_{e1}-E_{hh1}$	1.69	$E_{e1}-E_{lh1}$	1.81	??	1.876	??
Mn410	1.55	Kusur	1.65	$E_{e1}-E_{hh1}$	1.76	??	1.766	??

Alberi ve diğ. (2008) tarafından çalışmalarda Mn atomunun bant aralığı üzerine etkisi valans bandının ikiye yarılması şeklinde modellenmiştir. Bu iki yarılan kollardan birisi Mn kaynaklı kusur bandı diğeri de valans bandı kenarının Mn konsantrasyonuna bağlı olarak değişmesidir. Bu çalışmada valans bandı kenarının Mn konsantrasyonu ile hemen hemen lineer olarak azalarak değiştiği belirlenmiştir. Rodrigues ve diğ. (2012) yaptığı çalışmada optik bant aralığının Mn'sız örnekler göre çok az kaydığını rapor etmiştir. Bu çalışmalar gözönüne Mn'lı örneklerde, Mn miktarının alaşımlama için oldukça düşük olması (%0.1), GaMnAs alaşımlarının elektronik bant yapısı üzerine etkisinin çok fazla olmaması gerektiğini düşündürmektedir. Bu nedenle, Tablo 5.1'de AE-3 enerjisine çok yakın olan enerji değerleri $E_{e1}-E_{hh1}$ geçişi olarak değerlendirilmiştir. Tablo 5.3'deki (100) yönelimli örneğe ait ME-3 geçiş enerjisi, referans örneğinin $E_{e1}-E_{hh1}$ geçiş enerjisinden çok küçük olup, kusur seviyesinden gelen katkı olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 4.2'de ve Tablo 4.4'te verilen diğer yüksek enerjili optik geçişler, referans örneğinde olduğu gibi izinli yüksek baş kuantum sayılı hesaplanmış olan izinli optik geçişlerle arasında ciddi fark vardır. Yine benzer şekilde, bu geçişler yüksek ağır boşluk kuantum sayılı izinsiz geçiş ile $E_{e1}-E_{hh2/3}$ geçişleri uyumlu olsa da bu geçişler Tablo 5.1 ve 5.2 açıkça belirtilmemiştir. Çünkü bu geçiş enerjileri GaAs valans bandındaki kuantize boşluk bantları-bariyer bölgesi X vadisi (bulk) arası optik geçiş enerjisine de yakın değerdedir [76].

KAYNAKLAR

- [1]. Bayda, S., Adeel, M., Tuccinardi, T., Cordani, M., and Rizzolio, F., 2020, The history of nanoscience and nanotechnology: From chemical-physical applications to nanomedicine, *Molecules*, 25(1), pp. 1–15.
- [2]. Poole, C. P., and Owens, F. J., 2003, *Introduction to Nanotechnology*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, ISBN: 0471079359.
- [3]. Wolf, S. A., Awschalom, D., Buhrman, R., Daughton, J., von Molnar, S., Roukes, M., Chtchelkanova, A., and Treger, D., 2001, Spintronics: A spin-based electronics vision for the future, *Science*, 294(5546), pp. 1488–1495.
- [4]. Furdyna, J., Dong, S., Lee, S., Liu, X., and Dobrowolska, M., 2019, The ubiquitous nature of chalcogenides in science and technology, *Chalcogenide: From 3D to 2D and Beyond*. Elsevier LTD.
- [5]. Dietl, T., and Ohno, H., 2003, Ferromagnetic III-V and II-VI semiconductors, *MRS Bull.*, vol. 28, no. 10, pp. 714–719.
- [6]. Katayama, H., and Sato, K., 2003, Spin and charge control method of ternary II-VI and III-V magnetic semiconductors for spintronics: Theory vs. experiment, *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 64, no. 9–10, pp. 1447–1452, 2003.
- [7]. Baibich, M., Broto, J., Fert, A., Nguyen Van Dau, F., and Petroff, F., 1988, Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices, *Physical Review Letters*, 61(21), pp. 2472–2475.
- [8]. Zutic, I., Fabian, J., and Das Sarma, S., 2004, Spintronics: Fundamentals and Applications, *Reviews of Modern Physics*, 76(2), pp. 323–410.
- [9]. Bernal, M., Dussan, A., and Mesa, F., 2012, Structural, optical and morphological properties of Ga_{1-x}Mn_xAs thin films deposited by magnetron sputtering for spintronic device applications, *Physica B: Condensed Matter*, 407(16), pp. 3210–3213.
- [10]. Yoon, I. T., Kang, T., Kim, K., and Kim, D., 2004, Spin disorder scattering mechanism of ferromagnetic Ga_{1-x}Mn_xAs layers on (100) GaAs substrates, *Journal of Applied Physics*, 95(7), pp. 3607–3611.
- [11]. Adachi, S., 1985, GaAs, AlAs, and Al_xGa_{1-x}As: Material parameters for use in research and device applications, *Journal of Applied Physics*, 58(3).
- [12]. Vurgaftman, I., Meyer, J. R., and Ram-Mohan, L. R., 2001, Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys, *Journal of Applied Physics*, 89(11 I), pp. 5815–5875.
- [13]. Walters, R. J. *et al.* 2011, ‘Design of an achievable, all lattice-matched multijunction solar cell using InGaAlAsSb, *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 000122–000126.

- [14]. Olshanetsky, B. Z., and Mashanov, V. I., 1981, LEED studies of clean high Miller index surfaces of silicon, *Surface Science*, 111(3), pp. 414–428.
- [15]. Notzel, R., Daweritz, L., and Ploog, K., 1992, Topography of high- and low-index GaAs surfaces, *Physical Review B*, 46(8), pp. 4736–4743.
- [16]. Chadi, D., 1985, Atomic and electronic structures of (111), (211), and (311) surfaces of GaAs, *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 3(4), p. 1167.
- [17]. Valster, A., Liedenbaum, C., Finke, M., Severens, A., Boermans, M., Vandenhouedt, D., and Bulle-Lieuwma, C., 199, High quality $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{In}_y\text{P}$ alloys grown by MOVPE on (311) B GaAs substrates, *Journal of Crystal Growth*, 107(1–4), pp. 403–409.
- [18]. Jen, H., Jou, M., Chereng, Y., and Stringfellow G., 1987, The kinetic aspects of ordering in $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ grown by organometallic vapor phase epitaxy, *Journal of Crystal Growth*, 85(1–2), pp. 175–181.
- [19]. Houn, M. P., Chang, Y. C., and Wang, W. I., 1988, Orientation dependence of valence-subband structures in $\text{GaAs-Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ quantum-well structures, *Journal of Applied Physics*, 64(9), pp. 4609–4613.
- [20]. Zaied, I., Fitouri, H., Chine, Z., Rebey, A., and El Jani, B., 2014, Atmospheric-pressure metal-organic vapor-phase epitaxy of GaAsBi alloys on high-index GaAs substrates, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 75(2), pp. 244–251.
- [21]. Tilouche, S., Janet, H., Sfaxi, L., and M’Ghaieth, R., 2017, Effect of Mn concentration and strain on the band structure of GaMnAs : Theoretical study, *International Journal of Recent Trends in Engineering and Research*, 3(10), pp. 169–174.
- [22]. Furdyna, J., 1988, Diluted magnetic semiconductors, *Journal of Applied Physics*, 64(4).
- [23]. Wadley, P., 2012, *X-ray Magnetic Circular Dichroism Studies of III-Mn-V Compounds*, Doctor of Philosophy, University of Nottingham.
- [24]. Ohno, H., Munekata, H., Penny, T., von Molnar, S., and Chang, L., 1992, Magnetotransport properties of p-type $(\text{In,Mn})\text{As}$ diluted magnetic III-V semiconductors, *Physical Review Letters*, 68(17), pp. 2664–2667.
- [25]. Munekata, H., Ohno, H., von Molnar, S., Segmuller, A., Chang, L., and Esaki, L., 1989, Diluted magnetic III-V semiconductors, *Physical Review Letters*, 63(17), pp. 1849–1852.
- [26]. Zhao, K., Deng, Z., Wang, X., Han, W., Zhu, J., Li, X., Liu, Q., Yu, R., Goko, T., Frandsen, B., Liu, L., Ning, F., Uemura, Y., Dabkowska, H., Luke, G., Luetkens, H., Morenzoni, E., Dunsiger, S., Senyshyn, A., Böni, P., and Jic, C., 2013, New diluted ferromagnetic semiconductor with curie temperature up to 180 K and isostructural to the “122” iron-based superconductors, *Nature Communications*, 4, pp. 1–5.
- [27]. Koshihara, S., 1997, Ferromagnetic Order Induced by Photogenerated Carriers in

- Magnetic III-V Semiconductor Heterostructures of (In,Mn)As/GaSb, *Physical Review Letters*, 78, pp. 1–4.
- [28]. Ohno, H., Chiba, D., Matsukura, F., Omiya, T., Abe, E., Dietl, T., Ohno, Y., and Ohtani, K., 2000, Electric-field control of ferromagnetism, *Nature*, 408(6815), pp. 944–946.
 - [29]. Gan'shina, E., Golik, L., Kun'kova, Z., Zykov, G., Bykov, I., Rukovichnikov, A., Yuan, Y., Böttger, R., and Zhou, S., 2018, Magneto-optical spectroscopy of diluted magnetic semiconductors GaMnAs prepared by ion implantation and further impulse laser annealing, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 459, pp. 141–146.
 - [30]. Wurstbauer, U., Sperl, M., Soda, M., Neumaier, D., Schuh, D., Bayreuther, G., Zweck, J., and Wegscheider, W., 2008, Ferromagnetic GaMnAs grown on (110) faced GaAs, *Applied Physics Letters*, 92(10), pp. 2006–2009.
 - [31]. Xu, J. F., Liu, S., Xiao, M., and Thibado, P., 2007, Electrical and optical studies of GaMnAs/GaAs(001) thin films grown by molecular beam epitaxy, *Journal of Crystal Growth*, 301–302(SPEC. ISS.), pp. 101–104.
 - [32]. Liu, X., Furdyna, J., Dobrowolska, M., Lim, W., Xie, C., and Chou, Y., 2007, Unique properties of magnetotransport in GaMnAs films grown on vicinal and high-index planes, *Journal of Physics Condensed Matter*, 19(16).
 - [33]. Gunes, M., Gumus, C., Galvão Gobato, Y., and Henini, M., 2017, Structural and optical properties of diluted magnetic $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ –AlAs quantum wells grown on high-index GaAs planes, *Bulletin of Materials Science*, 40(7), pp. 1355–1359.
 - [34]. Wang, K. Y., Edmonds, K., Zhao, L., Sawicki, M., Campion, R., Gallagher, B., and Foxon, C., 2005, (Ga,Mn)As grown on (311) GaAs substrates: Modified Mn incorporation and magnetic anisotropies, *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 72(11), pp. 1–6.
 - [35]. Ohno, Y., Young, D., Beschoten, B., Matsukura, F., Ohno, H., and Awschalom, D., 2001, Electrical spin injection in ferromagnetic/nonmagnetic semiconductor heterostructures, *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 10(1–3), pp. 489–492.
 - [36]. Moriya, R., and Munekata, H., 2003, Relation among concentrations of incorporated Mn atoms, ionized Mn acceptors, and holes in p-(Ga,Mn)As epilayers, *Journal of Applied Physics*, 93(8), pp. 4603–4609.
 - [37]. Zhao, L. X., Staddon, C., Wang, K., Edmonds, K., Campion, R. P., and Foxon, C., 2005, Intrinsic and extrinsic contributions to the lattice parameter of GaMnAs, *Applied Physics Letters*, 86(7), pp. 1–3.
 - [38]. Poggio, M., Myers, R., Stern, N., Gossard, A., and Awschalom, D., 2005, Structural, electrical, and magneto-optical characterization of paramagnetic GaMnAs quantum wells, *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 72(23).
 - [39]. Shamirzaev, T. S., Zhuravlev, K. S., and Yakusheva, N. A., 1999, Free exciton recombination in heavily manganese-doped GaAs grown by liquid-phase epitaxy from

- bismuth solution, *Solid State Communications*, 112(9), pp. 503–506.
- [40]. Winkler, T. E., Stone, P., Li, T., Yu, K., Bonanni, A., and Dubon, O., 2011, Compensation-dependence of magnetic and electrical properties in $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{P}$, *Applied Physics Letters*, 98(1), pp. 1–4.
 - [41]. Kim, S., Oh, E., Lee, J., Kim, D. Lee, S., Furdyna, J., 2006, Effect of point defect and Mn concentration in time-resolved differential reflection in GaMnAs, *Applied Physics Letters*, 88(26).
 - [42]. Ohno, H., Shen, A, Matsukura, F., Oiwa, A., Endo, A., Katsumoto, S., and Iye, Y., 1996, (Ga,Mn)As: A new diluted magnetic semiconductor based on GaAs, *Applied Physics Letters*, 69(3), pp. 363–365.
 - [43]. Zhao, L. X., Campion, R. P., Fewster, P., Martin, R., Ya Ber, B., Kovarsky, A., Staddon, C., Wang, K., Edmonds, K., Foxon, C., and Gallagher, B., 2005, Determination of the Mn concentration in GaMnAs, *Semiconductor Science and Technology*, 20(5), pp. 369–373.
 - [44]. Ji, C., Zang, C., Zhao, G., Wang, W., Sun, G., Yuan, H., and Han, Q., 2011, Preparation and properties of diluted magnetic semiconductors GaMnAs by low-temperature molecular epitaxy, *Chinese Physics Letters*, 28(9).
 - [45]. Holý, V., Matěj, Z., Pachterová, O., Novák, V., Cukr, M., Olejník, K., and Jungwirth, T., 2006, Mn incorporation in as-grown and annealed (Ga,Mn)As layers studied by x-ray diffraction and standing-wave fluorescence, *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 74(24), pp. 1–9.
 - [46]. Gunes, M., Erken, O., Gumus, C., Yalaz, E., Pesen, E., Ukelge, M., Arpaway, B., Serincan, U., Taykurt Daday, M., Taykurt Daday, Y., Galvão Gobato, Y., and Henini, M., 2016, A comparative photoluminescence study on Mn-Free GaAs/AlAs and Mn-containing $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}/\text{AlAs}$ quantum wells (QWs) grown on various orientations by MBE, *Philosophical Magazine*, 96(3), pp. 223–229.
 - [47]. Pelá, R., Marques, M., Ferreira, L., Furthmüller, G., and Teles, L., 2012, GaMnAs: Position of Mn-d levels and majority spin band gap predicted from GGA-1/2 calculations, *Applied Physics Letters*, 100(20).
 - [48]. Sun, C., Kono, J., Cho, Y., Wojcik, A., Belyanin, A., and Munekata, H., 2011, Above-bandgap magneto-optical Kerr effect in ferromagnetic $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$, *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 83(12).
 - [49]. Ohya, S., Takata, K. and Tanaka, M., 2011, Nearly non-magnetic valence band of the ferromagnetic semiconductor GaMnAs, *Nature Physics*, 7(4), pp. 342–347.
 - [50]. Ohya, S., Muneta, I., Nam Hai, P., and Tanaka, M., 2010, Valence-band structure of the ferromagnetic semiconductor GaMnAs studied by spin-dependent resonant tunneling spectroscopy, *Physical Review Letters*, 104(16), pp. 3–6.
 - [51]. Ishii, T., Kawazoe, T., Hashimoto, Y., Terada, H., and Muneta, I., 2016, Electronic

structure near the Fermi level in the ferromagnetic semiconductor GaMnAs studied by ultrafast time-resolved light-induced reflectivity measurements, *Physical Review B*, 93(24), pp. 2–5.

- [52]. Ando, K., Saito, H., Agarwal, K., Debnath, M., and Zayets, V., 2008, Origin of the anomalous magnetic circular dichroism spectral shape in ferromagnetic $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$: Impurity bands inside the band gap, *Physical Review Letters*, 100(6), pp. 1–4.
- [53]. Patz, A., Li, T., Liu, X., Furdyna, J., Perakis, I., and Wang, J., 2015, Ultrafast probes of nonequilibrium hole spin relaxation in the ferromagnetic semiconductor GaMnAs, *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 91(15), pp. 1–7.
- [54]. Alberi, K., Yu, K., Stone, P., Dubon, O., Walukiewicz, W., Wojtowicz, T., Liu, X., and Furdyna, J., 2008, Formation of Mn-derived impurity band in III-Mn-V alloys by valence band anticrossing, *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 78(7), pp. 1–7.
- [55]. Okabayashi, J., Kimura, A., Rader, O., Mizokawa, T., Fujimori, A., Hayashi, T., and Tanaka, M., 2001, Electronic structure of $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ studied by angle-resolved photoemission spectroscopy, *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 10(1–3), pp. 192–195.
- [56]. Varshni, Y. P., 1967, Temperature dependence of the energy gap in semiconductors, *Physica*, 34(1), pp. 149–154.
- [57]. Dahan, P., 2007, Deeply bound donor states of interstitial Mn impurity in a GaAs quantum well, *Semiconductor Science and Technology*, 22, p. 1323.
- [58]. Rodrigues, D., Brasil, M., Galvao Gobato, Y., Holgado, D., Marques, G., and Henini, M., 2012, Anomalous optical properties of GaMnAs/AlAs quantum wells grown by molecular beam epitaxy, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 45(21).
- [59]. Matsukura, F., Ohno, H., Shen, A., and Sugawara, Y., 1998, Transport properties and origin of ferromagnetism in (Ga,Mn)As, *Physical Review B*, 57(4), p. R2038.
- [60]. Oiwa, A., Katsumoto, S., Endo, A., Hirasawa, M., Iye, Y., Ohno, H., Matsukura, F., Shen, A., and Sugawara, Y., 1997, Nonmetal-metal-nonmetal transition and large negative magnetoresistance in (Ga, Mn)As/GaAs, *Solid State Communications*, 103(4), pp. 209–213.
- [61]. Baca, A., 2005, *Fabrication of GaAs Devices*, The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, ISBN:9780863413537.
- [62]. Sarcan, F., 2018, *Rezonans Kaviteli ve İç Kazançlı GaInNAs - Tabanlı IR Fotodedektör*, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [63]. Shaw, D. W., 1981, Localized GaAs Etching with Acidic Hydrogen Peroxide Solutions, *Journal of The Electrochemical Society*, 128(4), pp. 874–880.
- [64]. Rhoderick, P., and Williams, H., 1988, *Metal-semiconductor contacts*, Clarendon Press,

ISBN: 0198593368.

- [65]. Dönmez, Ö., 2008, *Kuantum kuyulu yariletken yapıların modülasyon spektroskopisi ile incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [66]. Dönmez, Ö., 2013, *Düşük boyutlu yariletken yapıların modülasyon spektroskopisi ile incelenmesi*, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [67]. Dönmez, Ö., Nutku F., Erol A., Arikan C., ve Ergun Y., 2012, A study of photomodulated reflectance on staircaselike, n-doped GaAs/Al_xGa_{1-x}As quantum well structures, *Nanoscale Research Letters*, 41(5), p. 738.
- [68]. Kudrawiec, R., Sek, G., Ryczko, K., Misiewicz, J., and Harmand, L., 2004, Photoreflectance investigations of oscillator strength and broadening of optical transitions for GaAsSb-GaInAs/GaAs bilayer quantum wells, *Applied Physics Letters*, 84(18), pp. 3453–3455.
- [69]. Cavallini, A., and Polenta, L., 2008, *Electrical characterization of nanostructures*, Characterization of Semiconductor Heterostructures and Nanostructures, In: Lamberti, C., Elsevier Science, Torino, Italy, ISBN:9780444595515.
- [70]. Lampert, M. A., and Schilling, R. B., 1970 Current Injection in Solids: The Regional Approximation Method, *Semiconductors and Semimetals*, 6(C), pp. 1–96.
- [71]. Jungwirth, T., Sinova, J., Masek, J., Kusera, J., and MacDonald, A., 2006, Theory of ferromagnetic (III,Mn)V semiconductors, *Reviews of Modern Physics*, 78(3), pp. 809–864.
- [72]. Reynolds, S., Monica, B., and Benkhedir, M., 2017, Photoconductivity in Materials Research, *Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials*, p. 1
- [73]. Stellmacher, M., Schnell, J., Adam, D., and Nagle, J., 1999, Photoconductivity investigation of the electron dynamics in GaAs grown at low temperature, *Applied Physics Letters*, 74(9), pp. 1239–1241.
- [74]. Ohno, H., 1999, Properties of ferromagnetic III–V semiconductors, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 200(1–3), pp. 110–129.
- [75]. Chadi, D., 2003, Arsenic-antisite defect in GaAs : Multiplicity of charge and spin states, *Physical Review*, pp. 1–4.
- [76]. Xin, J., Tang, Y., Liu, Y., Zhao, X., Pan, H., and Zhu, T., 2018, Valleytronics in thermoelectric materials, *npj Quantum Materials*, 3(1), 1-10.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Shemshat KERİMOVA
Doğum Yeri	
Doğum Tarihi	
Uyruğu	☐ T.C. ☒ Diğer: Türkmenistan
Telefon	
E-Posta Adresi	
Web Adresi	

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Fen Fakültesi
Bölümü	Fizik Bölümü
Mezuniyet Yılı	02.06.2017

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Fizik
Programı	Katıhal Fiziği