

**KUANTUM SINIRLI SAFSIZLIK
ATOMLARININ KULLANILDIĞI THz
DEDEKTÖR YAPILARIN MBE YÖNTEMİYLE
BÜYÜTÜLMESİ ve KARAKTERİZASYONU**

Doktora Tezi

Güven KORKMAZ

Eskişehir, 2017

**KUANTUM SINIRLI SAFSIZLIK ATOMLARININ KULLANILDIĞI THz
DEDEKTÖR YAPILARIN MBE YÖNTEMİYLE BÜYÜTÜLMESİ ve
KARAKTERİZASYONU**

Güven KORKMAZ

DOKTORA TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Uğur SERİNCAN

Eskişehir

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Mayıs, 2017

Bu Tez Çalışması BAP Komisyonunca kabul edilen 1209F140 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Güven KORKMAZ'ın "Kuantum Sınırlı Safsızlık Atomlarının Kullanıldığı THz Dedektör Yapıların MBE Yöntemiyle Büyütülmesi ve Karakterizasyonu" başlıklı tezi 24/05/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca, Fizik Anabilim dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

	<u>Unvanı-Adı Soyadı</u>	<u>İmza</u>
Üye (Tez Danışmanı)	: Doç. Dr. Uğur SERİNCAN
Üye	: Doç. Dr. Mustafa KULAKCI
Üye	: Prof. Dr. Aydın DOĞAN
Üye	: Prof. Dr. Mehmet PARLAK
Üye	: Yard. Doç. Dr. Tunay TANSEL

.....

Enstitü Müdürü

ÖZET

KUANTUM SINIRLI SAFSIZLIK ATOMLARININ KULLANILDIĞI THz DEDEKTÖR YAPILARIN MBE YÖNTEMİYLE BÜYÜTÜLMESİ ve KARAKTERİZASYONU

Güven KORKMAZ

Fizik Anabilim Dalı

Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mayıs, 2017

Danışman: Doç. Dr. Uğur SERİNCAN

Elektromanyetik tayfın Terahertz (THz) frekans bölgesinde çalışan algılayıcı sistemler çok geniş kullanım alanlarına sahiptir. Ancak sahip olduğu büyük potansiyele rağmen bu bölgede çalışan algılama sistemleri yeterli olgunluğa erişememiştir. Bu eksikliği gidermek için var olan sistemlere alternatif bir yaklaşımla kuantum kuyu içine yerleştirilen bir boyutta sınırlandırılmış safsızlık atomlarının hidrojenik enerji seviyeleri ($1s, 2p_{\pm}$) kullanılarak kompakt THz algılayıcılar üretmek mümkündür.

Bu çalışma, kuantum sınırlı safsızlık atomlarının dipol izinli geçişlerini ($1s \rightarrow 2p_{\pm}$) esas alan THz algılama sistemlerinin MBE sisteminde büyütülmelerini ve yapılan optoelektronik karakterizasyonlarını kapsamaktadır. Öncelikle çoklu kuantum kuyu ve çift engel tınlaşım tünelleme yapılar üzerinden delta katkılama çalışmaları yapılmıştır. Çoklu kuantum kuyu örnekler için fotoluminesans (PL) ölçümleri ile ve çift engel tınlaşım tünelleme örnekleri için karanlık akım ve voltaj bağımlı PL ölçümleri ile karakterizasyonlar yapılmıştır. Delta katkılama için belirlenen parametreler kullanılarak çoklu kuantum kuyular üretilmiş ve uzak kızılötesi (FIR) bölgede soğurma ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlerde p-tipi delta katkılanan örnekler için $1s \rightarrow 2p_{\pm}$ geçişleri soğurma spektrumunda gözlemlenmiştir. Yanal aygıt tasarımına sahip aygıtlar için karanlık akım, fotoakım ve fototepki karakterizasyonları yapılmıştır ancak net bir tepki gözlemlenememiştir.

Anahtar Sözcükler: Terahertz, safsızlık atomları, çoklu kuantum kuyu, dedektör, moleküler demet epitaksi.

ABSTRACT

MBE GROWTH and CHARACTERIZATION of THz DETECTOR STRUCTURES USING QUANTUM CONFINED IMPURITY ATOMS

Güven KORKMAZ

Department of Physics

Anadolu University, Graduate School of Sciences, May, 2017

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Uğur SERİNCAN

Detectors/emitters working at THz frequency region of the electromagnetic spectrum have very broad area of use. However, despite their great potential, detection systems operating in this region have not reached the sufficient maturity. To make up for this deficiency, THz detectors using the hydrogenic energy levels of the confined impurity atoms ($1s$, $2p_{\pm}$) located in a quantum well can be produced as an alternative approach to the existing systems.

This thesis contains production and characterization of THz detecting systems based on dipole allowed transitions between the energy states ($1s \rightarrow 2p$) of the quantum confined impurity atoms. At first, the delta doping studies were done by using double barrier resonant tunneling and multiple quantum well structures. Photoluminescence (PL) measurements for multiple quantum well samples and dark current and voltage dependent photoluminescence measurements for double barrier resonant tunneling samples were conducted. Multiple quantum well structures were grown with previously determined parameters for the delta doping, and the absorption measurements in the far-infrared (FIR) region were performed. In these measurements, $1s \rightarrow 2p_{\pm}$ transitions were observed in absorbance spectrum of p-type delta doped samples. Dark current, photocurrent and photo response characterizations have also been made for devices with lateral device design; however, no clear response was observed in the optical measurements.

Keywords: Terahertz, impurity atoms, multiple quantum well, detector, molecular beam epitaxy.

24/05/2017

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilemeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Anadolu Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

.....
Güven Korkmaz

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmamda bana bilgi ve birikimleriyle yön vermiş olan, geçirdiği zor zamanlara rağmen sabırla bana destek olan ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. Bülent ASLAN'a,

Yine aynı şekilde çalışmalarım sürecinde bilgi birikimi ve yol göstericiliği ile bana destek olup laboratuvarında çalışma olanağı sağlayan değerli hocam Doç. Dr. Uğur SERİNCAN'a,

Bu tez çalışması boyunca yoğun olarak kullandığım kuantum kuyu ve safsızlık atomları bağlanma enerjisi hesap programlarını kullanmama izin verdiği için Doç. Dr. Hasan YILDIRIM'a

Bu zorlu süreçte güler yüzü ve hoş sohbetiyle desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Mustafa KULAKÇI'ya,

Deneyisel çalışmalarımındaki yardımları ve desteklerini esirgemeyen arkadaşım Bülent ARIKAN'a,

Ve ayrıca tez çalışmamın litografi aşamasında doğrudan verdikleri destek ve deneyimlerinden yararlanma fırsatı için değerli arkadaşlarım Burcu ARPAPAY'a, Ayşe ŞEVİK'e, Seval ŞAHİN'e ve Melih KORKMAZ'a,

Bu süreçte yardımları ve arkadaşlıkları için Mehmet ERKUŞ'a, Samet ÖZDEMİR'e, Erdem YILDIRIM'a ve Şükrü ARDALI'ya,

Bütün bu süreç boyunca desteğini benden esirgemeyen ve hep yanımda olan anneme ve özellikle sonsuz manevi desteğinin yanında maddi olanaklarını da sonuna kadar kullanmama olanak sağlayan sevgili ablam Gülcihan KORKMAZ'a çok teşekkür ederim.

Güven KORKMAZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xxii
1. GİRİŞ	1
2. KUANTUM SINIRLI SAFSIZLIK ATOMLARI.....	5
2.1. GaAs/Al _x Ga _{1-x} As Kuantum Kuyu Yapılar	7
2.2. Kuantum Sınırlı Safsızlık Atomlarının Özellikleri	10
2.2.1. Kuantum kuyu genişliğinin safsızlık atomlarının bağlanma enerjilerine etkisi	12
2.2.2. Engel yüksekliğinin safsızlık atomlarının bağlanma enerjilerine etkisi	13
2.2.3. Kuantum kuyu içindeki safsızlık atomlarının konumlarının bağlanma enerjilerine etkisi	15
2.2.4. Safsızlık tipinin safsızlık atomlarının bağlanma enerjilerine etkisi.....	16
2.2.5. Manyetik alanın safsızlık atomlarının bağlanma enerjisine etkisi.....	17
2.3. Tınlaşım Tünelleme Yapılar ve Safsızlık Atomları.....	18
2.4. Kuantum Sınırlı Safsızlık Atomları Üzerinden THz Algılama.....	21
3. DENEYSEL YÖNTEMLER.....	24

3.1. MBE sisteminde GaAs Büyütme ve Delta Katkılama	24
3.1.1. MBE sistemi ve GaAs tek kristal büyütme	24
3.1.2. Delta (δ) katkılama.....	29
3.2. Yapısal Karakterizasyonlar	32
3.2.1. X-ışını kırınım (XRD) ve X-ışını yansıma (XRR) yöntemleri	32
3.2.2. Spektroskopik elipsometre	35
3.3. Aygıt Üretimi	36
3.4. Akım-Voltaj (I-V) Ölçüm Sistemi.....	41
3.5. Optik Karakterizasyonlar	42
3.5.1. Fotoluminesans ölçümleri.....	42
3.5.2. Soğurma spektrumu ölçümleri	44
3.5.3. Tayfsal fototepki ölçümleri.....	45
4. MOLEKÜLER DEMET EPİTAKSİ SİSTEMİ TEMEL BÜYÜTME PARAMELERİ ve DELTA KATKILAMA ÇALIŞMALARI	46
4.1. GaAs ve AlAs MBE Temel Büyütme Parametreleri Kalibrasyonları	47
4.1.1. $Al_xGa_{1-x}As$ büyüme hızı ve alaşım oranı kalibrasyonu	48
4.1.2. Si ve Be katkı konsantrasyonu kalibrasyonları.....	51
4.1.3. MQW yapıların büyütülmesi ve Hassas büyütme hızı kalibrasyonu	52
4.2. Büyütme Sıcaklığının Delta Katkılamaya Etkisi.....	56
4.2.1. Süperörgü örnekler üzerinden karakterizasyon	56
4.2.2. Çoklu kuantum kuyu örnekler üzerinden karakterizasyon.....	59
4.3. As_2 ve As_4 Akısının Delta Katkılamaya Etkisi.....	65
4.4. Süperörgü ve Çoklu Kuantum Kuyu Yapılarda Delta Katkılama Karşılaştırılması	69
5. KÜANTUM KUYU İÇİNDEKİ SAFSIZLIK ATOMLARININ OPTO- ELEKTRONİK KARAKTERİZASYONLARI	73
5.1. Delta Katkılı Çoklu Kuantum Kuyu Yapılar için Yapılan Fotoluminesans Karakterizasyonları	73

5.1.1. Delta katkılama süresi ve katkı efüzyon hücre sıcaklığının etkisi.....	73
5.1.2. Katkı atomuna bağlı olarak bağlanma enerjisi değişimi.....	77
5.1.3. Katkı atomunun kuantum kuyu içindeki konumunun bağlanma enerjisine etkisi	81
5.2. Asimetrik Çift Engel Tınlaşım Tünelleme Diyot Yapılar Üzerinden Safsızlık Seviyelerinin Optoelektronik Karakterizasyonları	84
5.2.1. Si delta katkılı tınlaşım tünelleme diyot örnekleri	84
5.2.1.1. Si delta katkılı tınlaşım tünelleme diyot örnekleri için karanlık akım ölçümleri	85
5.2.1.2. Si delta katkılı tınlaşım tünelleme diyot örnekleri için voltaj bağımlı PL ölçümleri.....	88
5.2.1.3. Si delta katkılı tınlaşım tünelleme diyot örnekleri için manyetik alan altında karanlık akım ölçümleri.....	92
5.2.2. Be delta katkılı tınlaşım tünelleme diyot örnekleri	94
6. THz DEDEKTÖR YAPILARIN OPTOELEKTRONİK KARAKTERİZASYONLARI	99
6.1. Delta Katkılı Çoklu Kuantum Kuyu Yapıların THz Soğurma Spektrumu Ölçümleri	100
6.2. Delta Katkılı Çoklu Kuantum Kuyu Aygıtların Karanlık Akım, Fotoakım ve Fototepki Ölçümleri.....	106
7. SONUÇ.....	114
KAYNAKÇA.....	117
ÖZGEÇMİŞ	

TABLolar DİZİNİ

Sayfa

Tablo 4.1 <i>Büyüme hızı kalibrasyon örneği için SE yöntemiyle elde edilen sayısal sonuçlar</i>	47
Tablo 4.2 <i>Büyütülen hassas kalınlık kalibrasyon örneklerinin MBE büyüme parametreleri</i>	53
Tablo 4.3 <i>Hassas kalınlık kalibrasyon örnekleri için RC ve XRR ölçümlerine benzetim işlemi uygulanarak elde edilen sayısal sonuçlar</i>	54
Tablo 4.4 <i>Hassas kalınlık kalibrasyon örnekleri için 9 K sıcaklıkta alınan PL ölçümlerinden elde edilen sayısal sonuçlar</i>	55
Tablo 4.5 <i>Delta katkılama sıcaklığını belirlemek amacıyla oluşturulan 50 tekrarlı süperörgü örnek grubu için MBE sisteminde kullanılan büyüme parametreleri</i>	56
Tablo 4.6 <i>Delta katkılama sıcaklığını belirlemek amacıyla oluşturulan 50 tekrarlı süperörgü örnek grubu için yapılan XRD ölçümlerinden elde edilen sayısal sonuçlar</i>	58
Tablo 4.7 <i>Delta katkılama sıcaklığını belirlemek amacıyla oluşturulan 50 tekrarlı süperörgü örnek grubu için yapılan düşük sıcaklık PL ölçümlerinden elde edilen sayısal sonuçlar</i>	59
Tablo 4.8 <i>Delta katkılama sıcaklığını belirlemek amacıyla oluşturulan 50 tekrarlı çoklu kuantum kuyu örnek grubu için MBE sisteminde kullanılan büyüme parametreleri</i>	60
Tablo 4.9 <i>Delta katkılama sıcaklığını belirlemek amacıyla oluşturulan 50 tekrarlı çoklu kuantum kuyu örnek grubu için yapılan XRD ölçümlerinden elde edilen sayısal sonuçlar</i>	61
Tablo 4.10 <i>Delta katkılama sıcaklığını belirlemek amacıyla oluşturulan 50 tekrarlı çoklu kuantum kuyu örnek grubu için düşük sıcaklıkta 0,6 mW lazer uyarım şiddeti altında alınan PL ölçümlerinden elde edilen sayısal sonuçlar</i>	65
Tablo 4.11 <i>As molekül yapısının delta katkılama etkisini belirlemek amacıyla oluşturulan 50 tekrarlı çoklu kuantum kuyu örnek grubu için MBE sisteminde kullanılan büyüme parametreleri</i>	66

Tablo 4.12 <i>As molekül yapısının delta katkılama etkisini belirlemek amacıyla oluşturulan 50 tekrarlı çoklu kuantum kuyu örnek grubu için XRD ölçüm sonuçlarından elde edilen sayısal sonuçlar</i>	67
Tablo 4.13 <i>As molekül yapısının delta katkılama üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla oluşturulan 50 tekrarlı çoklu kuantum kuyu örnek grubu için düşük sıcaklıkta 0,2 mW lazer uyarım şiddeti altında alınan PL ölçümlerinden elde edilen sayısal sonuçlar</i>	69
Tablo 4.14 <i>Süperörgü ve çoklu kuantum kuyu örnek grubu için MBE sisteminde kullanılan büyütme parametreleri</i>	70
Tablo 4.15 <i>Delta katkılama sıcaklığını belirlemek amacıyla oluşturulan Si delta katkılı 50 tekrarlı çoklu kuantum kuyu örnek grubu için düşük sıcaklıkta 10 mW lazer uyarım şiddeti altında alınan PL ölçümlerinden elde edilen sayısal sonuçlar</i>	71
Tablo 4.16 <i>Delta katkılama sıcaklığını belirlemek amacıyla oluşturulan Be delta katkılı 50 tekrarlı çoklu kuantum kuyu örnek grubu için düşük sıcaklıkta 0,2 mW lazer uyarım şiddeti altında alınan PL ölçümlerinden elde edilen sayısal sonuçlar</i>	72
Tablo 5.1 <i>NB317, NB318 ve NB346 kod numaralı örneklerinin MBE büyütme parametreleri</i>	74
Tablo 5.2 <i>NB318 ve NB346 kod numaralı 50 tekrarlı çoklu kuantum kuyu örnekleri için düşük sıcaklıkta 0,6 mW lazer uyarım şiddeti altında alınan PL ölçümlerinden elde edilen sayısal sonuçlar</i>	75
Tablo 5.3 <i>Katkısız referans, Si, Be ve Te delta katkılı çoklu kuantum kuyu örneklerinin MBE büyütme parametreleri</i>	77
Tablo 5.4 <i>Katkısız referans, Si, Be ve Te delta katkılı çoklu kuantum kuyu örnekleri için düşük sıcaklıkta 0,6 mW lazer uyarım şiddeti altında alınan PL ölçümlerinden elde edilen sayısal sonuçlar</i>	78
Tablo 5.5 <i>Delta katkı konumu farkı çoklu kuantum kuyu grup örnekleri için düşük sıcaklıkta 0,6 mW lazer uyarım şiddeti altında alınan PL ölçümlerinden elde edilen sayısal sonuçlar</i>	81
Tablo 5.6 <i>Si delta katkılı asimetrik çift engel tınlaşım diyot yapısı</i>	84
Tablo 5.7 <i>Si delta katkılı çift engel tınlaşım tünelleme örnekleri için MBE büyütme parametreleri</i>	85

Tablo 5.8 <i>Çift engel tınlaşım tünelleme örnekleri için karanlık akım ölçümlerinin sayısal sonuçları</i>	88
Tablo 5.9 <i>Çift engel tınlaşım tünelleme örnekleri için voltaj bağımlı PL ölçümlerinin sayısal sonuçlar</i>	91
Tablo 5.10 <i>Be için asimetrik çift engel tınlaşım diyot yapısı</i>	95
Tablo 5.11 <i>Be delta katkıli çift engel tınlaşım tünelleme örnekler ve büyütme parametreleri</i>	95
Tablo 6.1 <i>Katkısız referans, Si ve Be delta katkıli çoklu kuantum kuyu örneklerinin MBE büyütme parametreleri</i>	99

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1 <i>Elektromanyetik spektrumun farklı bölgelerinin uygulama alanlarıyla birlikte isimlendirmelerinin sunulduğu görsel</i>	1
Şekil 2.1 <i>Külçe yarıiletkendeki verici atomunun temsili gösterimi</i>	6
Şekil 2.2 <i>0 K sıcaklıkta zinc blende kristal yapısındaki III-V malzemeleri için ikili (noktalar) ve üçlü (çizgiler) bileşiklerin örgü sabitlerine karşılık Γ-vadisi yasak bant aralık enerjisi</i>	8
Şekil 2.3 <i>GaAs/Al_xGa_{1-x}As kuantum kuyu sisteminin temsili bant yapısı</i>	9
Şekil 2.4 <i>Kuantum kuyu içindeki safsızlık (verici) atomlarının sınırlanmış enerji seviyelerinin şematik gösterimi</i>	10
Şekil 2.5 <i>Kuantum kuyu içindeki verici atomların dalga fonksiyonuna (a) kuyu genişliğinin, (b) verici atomlarının konumlarının etkisinin şematik gösterimi</i>	11
Şekil 2.6 <i>GaAs/Al_{0,3}Ga_{0,7}As malzeme sistemi için yinelemeli shooting algoritmasıyla hesaplanan kuantum kuyu merkezindeki safsızlık atomlarının kuyu genişliğine bağlı olarak (a) 1s (kırmızı) ve 2p\pm (mavi) bağlanma enerjilerinin (b) 1s-2p\pm enerji farkının değişimini veren grafik</i>	13
Şekil 2.7 <i>GaAs/Al_{0,3}Ga_{0,7}As malzeme sistemi için yinelemeli shooting algoritmasıyla hesaplanan kuantum kuyu merkezindeki safsızlık atomlarının engel yüksekliğine bağlı olarak (a) 1s (kırmızı) ve 2p\pm bağlanma enerjilerinin (b) 1s-2p\pm enerji farkının değişimini veren grafik</i>	14
Şekil 2.8 <i>GaAs/Al_xGa_{1-x}As malzeme sistemi için 300 Å sabit kuyu genişliğindeki süperörgülerde engel genişliğine bağlı olarak enerji bant oluşumunu veren hesaplama sonuçları</i>	15
Şekil 2.9 <i>GaAs/Al_{0,3}Ga_{0,7}As malzeme sistemi için yinelemeli shooting algoritmasıyla hesaplanan 50 Å kuantum kuyu genişlikli sistem için safsızlık atomlarının kuyu içindeki konumlarına bağlı olarak (a) 1s (kırmızı) ve 2p\pm (mavi) bağlanma enerjilerinin (b) 1s-2p\pm enerji farkının değişimini veren grafik</i>	16

Şekil 2.10 (a) Verici atomları için kuyu genişliğine ve engel yüksekliğine bağlı olarak bağlanma enerjisi değişimi (b) $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ engel yüksekliği için alıcı atomlarının kuyu genişliğine bağlı olarak bağlanma enerjisi değişimi	17
Şekil 2.11 $GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ malzeme sistemi için yinelemeli shooting algoritmasıyla hesaplanan 50 \AA kuantum kuyu genişlikli sistem için safsızlık atomlarının manyetik alan altında bağlanma enerjileri ve bu enerjiler arasındaki farkın değişimini veren grafik. Yeşil çizgiler kuantum kuyu merkezindeki ve kesikli çizgiler kuantum kuyu kenarındaki safsızlık atomlarının durumlarını temsil etmektedir.	18
Şekil 2.12 Tınlaşım (rezonans) tünelleme diyot içindeki safsızlık durumları kullanılarak THz ışınım üretiminin şematik gösterimi.	19
Şekil 2.13 Verici safsızlık seviyesinden tünellemeyi gösteren akım -voltaj (üst) ve türevi (alt) eğrileri	20
Şekil 2.14 Manyetik alanın tünellemeye etkisini gösteren akım -voltaj grafiği (sol). Tünellemenin gözlemlendiği bölgedeki tepe noktasının vadinin dibindeki noktaya oranının manyetik alanla değişimi (sağ)	21
Şekil 2.15 Biri p-tipi (L152) ve ikisi n-tipi (L78, L79) farklı konsantrasyonlarda δ -katkılı üç örnek için frekansa karşı tepkisellik ölçümü. Sol alt iç grafik safsızlık seviyeleri arası uyarılmaya bağlı geçişi temsil etmektedir. Sağ alt grafik ise L79 ve L152 örnekleri için uygulanan voltaja karşılık tepkiselliğin değişimini göstermektedir	22
Şekil 2.16 Farklı kalınlık, tekrar sayısı ve δ -katkı konsantrasyonu için frekansa karşılık tepkisellik grafiği	22
Şekil 2.17 Yanal aygıt tasarımıyla çalışan algılayıcı sistem. Kuantum kuyu katmanlar beyaz ve engel katmanları siyah çizgilerle gösterilmektedir. Örnek katmanlarına dik gelen THz em dalgalarla $1s$ seviyesinden $2p_{\pm}$ bant benzeri uyarılmış seviyesine çıkan elektronların uygulanan elektrik alan (mavi ok) altında kontak bölgesine sürüklenme (yeşil ok) mekanizmasının temsili gösterimi.....	23

Şekil 3.1	<i>Bu tez kapsamında yarıiletken epitaksiyel kristal büyütmelerinde kullanılan Anadolu Üniversitesi Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda kurulu bulunan MBE sisteminin genel görünümü</i>	25
Şekil 3.2	<i>Katı kaynaklı bir MBE sistemini genel görünüşü</i>	26
Şekil 3.3	<i>GaAs kuantum kuyu tabakanın içine tek atomik katman olarak yerleştirilen safsızlık atomlarının temsili gösterimi</i>	30
Şekil 3.4	<i>GaAs kuantum kuyu tabakanın içine tek atomik katman olarak yerleştirilen safsızlık atomlarının büyütme doğrultusunda difüzyona uğrayarak kuantum kuyu içinde delta fonksiyonu benzeri konsantrasyon dağılımı (L kuantum kuyu genişliği ve z_i kuantum kuyu içindeki konum). Bu grafikte sırasıyla siyah, kırmızı, mavi ve yeşil renkler artan yönde difüzyon büyüklüğünü temsil etmektedir.</i>	31
Şekil 3.5	<i>Bu tez kapsamında büyütülen yarıiletken kristal tabakaların yapısal karakterizasyonlarında kullanılan Anadolu Üniversitesi Nanoboyut Araştırma Laboratuvarında kurulu bulunan Panalytical X'Pert Pro MRD yüksek çözünürlüklü x-ışını kırınım cihazı</i>	33
Şekil 3.6	<i>Kristal düzlemine θ açısıyla gelen x-ışınlarının farklı atomik katmanlardan saçılırken aralarında oluşan faz farkının şematik gösterimi</i>	34
Şekil 3.7	<i>GaAs (100) alttaş üzerine büyütülen farklı özellikteki AlAs epikatmanlar için yapılan benzetim sonuçları</i>	34
Şekil 3.8	<i>Eliptik polarize elektromanyetik dalganın temsili gösterimi (üst) ve elipsometre ölçüm sisteminin çalışma prensibini temsili olarak gösterimi (alt)</i>	36
Şekil 3.9	<i>Çift engel tınlaşım tünelleme (DBRT) örneklerinin fotolitografi süreçlerinin temsili gösterimi. a) numunenin üzerine fotorezist serilmesi, b) maskenin metal kaplı olmayan bölümlerinden geçen UV ışığın fotorezistin yapısını bozması, c) tab edilen numune, d) aşındırılan numunenin metal maskesi yardımıyla fotorezist ile maskelenmesi, e) metal kaplama sisteminde metal kaplama işleminin şematik gösterimi ve f) fotolitografi ve metal kaplama işlemleri tamamlanmış olan aygıt.</i>	39

Şekil 3.10 Yanal aygıt tasarımına THz ışık algılayıcıların yan yüzeylerinin etkin bir şekilde metal kaplanması için uygulanan açılı kaplama işleminin şematik gösterimi ve metal kaplanan yan al aygıt tasarımıyla üretilen THz algılayıcının temsili gösterimi	39
Şekil 3.11 DBRT numunelerin için; şematik masatepe (a) yapısı ve paketleme ve tel bağlama işlemi tamamlanmış aygıtların resmi (b), MQW numunelerin; şematik masatepe (c) yapısı ve paketleme ve tel bağlama işlemi tamamlanmış aygıtların resmi (d)	40
Şekil 3.12 I-V ölçüm sisteminin bileşenleri. Üstte ölçümlerde kullanılan kreostatın fotoğrafı verilmiştir. Altta güç kaynağı/akımölçer, sıcaklık kontrolcüsü ve kreostattan oluşan ölçüm sisteminin şematik görünümü verilmiştir	41
Şekil 3.13 Fotoluminesans ölçümlerinde kreostatla birlikte kullanılan FT-IR PL modülü deney düzeneği	43
Şekil 3.14 Soğurma ölçümlerinde kullanılan deney düzeneği	44
Şekil 3.15 Tayfsal fototepki ölçümlerinde kullanılan deney düzeneği ve FTIR içindeki optik yol	45
Şekil 4.1 Büyüme hızı kalibrasyon örneği için SE yöntemiyle elde edilen ölçüm ve benzetim sonuçları.....	48
Şekil 4.2 GaAs alttaşlar üzerine büyütülen farklı Al alaşım oranına sahip AlGaAs epikatman örnekler için GaAs (0 0 4) düzleminde alınan yüksek çözünürlüklü $w-2\theta$ ölçüm sonuçları	49
Şekil 4.3 GaAs alttaş üzerine büyütülen AlGaAs epikatman örnek için GaAs (0 0 4) düzleminde alınan yüksek çözünürlüklü $w-2\theta$ sallantı eğrisi (RC) ölçüm ve Epitaxy programında yapılan benzetim sonuçları.....	50
Şekil 4.4 GaAs alttaş üzerine düşük konsantrasyonda Si katkılanarak büyütülen AlGaAs epikatmanın oda sıcaklığında alınan PL ölçüm sonucunun normalize edilmiş grafiği. GaAs alttaştan gelen sinyal 1,42 eV ve AlGaAs tabakadan gelen sinyal 1,85 eV değerindedir	50
Şekil 4.5 GaAs sabit büyüme oranı için Si hücre sıcaklığına karşılık katkı konsantrasyonu	51
Şekil 4.6 GaAs sabit büyüme oranı için Be hücre sıcaklığına karşılık katkı konsantrasyonu	52

Şekil 4.7 50 tekrarlı hassas büyüme hızı kalibrasyon örnekleri için GaAs (004) düzleminde yapılan XRD $w-2\theta$ ölçüm sonuçları ve yapılan benzetim işlemi sonuçları.....	53
Şekil 4.8 50 tekrarlı hassas büyüme hızı kalibrasyon örnekleri için yapılan XRR ölçüm sonuçları ve yapılan benzetim işlemi sonuçları	54
Şekil 4.9 50 tekrarlı hassas büyüme hızı kalibrasyon örnekleri için 9 K sıcaklıkta 100 mW şiddetli 532 nm dalgaboylu lazer uyarımı altında yapılan PL ölçüm sonuçları.....	55
Şekil 4.10 50 tekrarlı süperörgü büyütme sıcaklığı grubu için yapılan GaAs (0 0 4) düzleminde XRD $w-2\theta$ ölçüm ve benzetim işlemi sonuçları	57
Şekil 4.11 50 tekrarlı süperörgü büyütme sıcaklığı grubu için 532 nm dalgaboylu düşük şiddet lazer uyarımı altında 9 K sıcaklıkta yapılan PL ölçümlerinin normalize sonuçları	59
Şekil 4.12 50 tekrarlı çoklu kuantum kuyu büyütme sıcaklığı grubu için GaAs (0 0 4) düzleminde yapılan XRD $w-2\theta$ ölçüm ve benzetim işlemi sonuçları	61
Şekil 4.13 NB317, NB356 ve NB357 kod numaralı örnekleri için 9 K sıcaklıkta 532 nm dalgaboylu lazerin uyarım şiddetinin NDF (Neutral density filter) yardımıyla değiştirilerek yapılan fotoluminesans ölçüm sonuçlarının normalize edilmiş hali.....	64
Şekil 4.14 NB317, NB356 ve NB357 kod numaralı örnekleri için 9 K sıcaklıkta 532 nm dalgaboylu lazerin 5 mW (a) ve 0,6 mW (b) uyarım şiddeti altında yapılan fotoluminesans ölçüm sonuçlarının normalize edilmiş hali.....	65
Şekil 4.15 NB383 ve NB384 kod numaralı 50 tekrarlı çoklu kuantum kuyu örnekleri için GaAs (0 0 4) düzleminde yapılan XRD $w-2\theta$ ölçüm ve benzetim işlemi sonuçları	67
Şekil 4.16 NB317, NB356 ve NB357 kod numaralı örnekleri için 9 K sıcaklıkta 532 nm dalgaboylu lazerin 0,6 mW lazer uyarımı için (a) normal ve (b) logaritmik ekseninde verilen normalize edilmiş PL ölçüm sonuçları. NB383 kod numaralı (a) ve NB384 kod numaralı (b) örnekleri için farklı lazer uyarım şiddeti altında yapılan normalize edilmiş fotoluminesans ölçüm sonuçları	68

Şekil 4.17 NB218 kod numaralı süperörgü ve NB507 kod numaralı çoklu kuantum kuyulu Si delta katkılı örnekler için 9 K sıcaklıkta 10 mW lazer uyarım şiddeti altında alınan PL ölçüm sonuçlarının normalize grafiği.....	70
Şekil 4.18 NB569 kod numaralı süperörgü ve NB507 kod numaralı çoklu kuantum kuyulu Be delta katkılı örnekler için 9 K sıcaklıkta (a) 0,6 mW ve (b) 10 mW lazer uyarım şiddeti altında alınan PL ölçüm sonuçlarının normalize grafiği	71
Şekil 5.1 NB318 ve NB346 kod numaralı örnekleri için GaAs (0 0 4) düzleminde yapılan HRXRD $w-2\theta$ ölçüm sonuçları	74
Şekil 5.2 NB318 ve NB346 kod numaralı örnekleri için 9 K sıcaklıkta (a) 0,6 mW ve (b) 5 mW lazer uyarım şiddeti altında yapılan PL ölçüm sonuçları	76
Şekil 5.3 NB506 kod numaralı katkısız referans örneği ile birlikte Si delta katkılı çoklu kuantum kuyu yapıların 9 K sıcaklıkta 0,6 mW lazer şiddeti altında alınan PL ölçümlerinin normalize edilmiş grafikleri.....	79
Şekil 5.4 NB506 kod numaralı katkısız referans örneği ile birlikte Be delta katkılı çoklu kuantum kuyu yapıların 9 K sıcaklıkta 0,6 mW lazer şiddeti altında alınan PL ölçümlerinin normalize edilmiş grafikleri.....	79
Şekil 5.5 NB506 ve NB509 Te delta katkılı çoklu kuantum kuyu yapıların 9 K sıcaklıkta 0,6 mW lazer şiddeti altında alınan PL ölçümlerinin normalize edilmiş grafikleri	80
Şekil 5.6 Katkısız referans, Si, Be, ve Te delta katkılı çoklu kuantum kuyu yapıların 9 K sıcaklıkta 0,6 mW lazer şiddeti altında alınan PL ölçümlerinin normalize edilmiş grafikleri	80
Şekil 5.7 NB506 kod numaralı katkısız referans örneği ile birlikte Si delta katkılı çoklu kuantum kuyu yapıların 9 K sıcaklıkta 0,6 mW lazer şiddeti altında alınan PL ölçümlerinin normalize edilmiş grafikleri.....	82
Şekil 5.8 NB506 kod numaralı katkısız referans örneği ile birlikte Be delta katkılı çoklu kuantum kuyu yapıların 9 K sıcaklıkta 0,6 mW lazer şiddeti altında alınan PL ölçümlerinin normalize edilmiş grafikleri.....	83

Şekil 5.9 NB364 ve NB365 kod numaralı çift engel tınlaşım tünelleme yapısına sahip örnekleri için $60 \times 60 \mu\text{m}^2$ boyutundaki aygıtlar için 6 K sıcaklıkta yapılan karanlık akım ölçüm sonuçları	85
Şekil 5.10 NB365 kod numaralı örnek için 6 K'de farklı boyuttaki aygıtlardan yapılan karanlık akım ölçümleri; (a) Akım-voltaj, (b) akım türevi-voltaj sonuçları.	87
Şekil 5.11 Çift engel tınlaşım tünelleme örnek grubu için $60 \times 60 \mu\text{m}^2$ boyutlarındaki aygıtlardan 6 K sıcaklıkta alınan karanlık akım ölçümleri; a) akım-voltaj ve b) akım türevi-voltaj grafikleri.....	87
Şekil 5.12 Çift engel tınlaşım tünelleme örnek grubu için $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ boyutlarındaki aygıtlardan 6 K sıcaklıkta yapılan akım-voltaj (solda) ve akım türevi-voltaj ölçüm sonuçları	89
Şekil 5.13 Çift engel tınlaşım tünelleme örnek grubu için $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ boyutlarındaki aygıtlardan 6 K sıcaklıkta 50 mW lazer şiddeti altında voltaj uygulanarak alınan PL ölçüm sonuçları. Sonuçlar sağda logaritmik eksen ve solda normal eksen verilmektedir.....	90
Şekil 5.14 Çift engel tınlaşım tünelleme örnek grubu için $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ boyutlarındaki aygıtlardan 6 K sıcaklıkta 50 mW lazer şiddeti altında farklı voltaj değerleri için (sol panel) ve sabit voltaj farklı lazer şiddetleri için (sağ panel) düşük sıcaklık PL ölçüm sonuçları	90
Şekil 5.15 NB364 kod numaralı örnek için $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ boyutundaki aygıttan 6 K sıcaklıkta farklı lazer şiddetleri altında voltaj bağımlı PL ölçümlerinden elde edilen sinyal yükseklikleri; $E_1 \rightarrow HH_1$ geçişlerine ait tepe yükseklikleri solda ve $2p \rightarrow HH_1$ geçişlerine ait tepe yükseklikleri sağda verilmiştir.....	91
Şekil 5.16 Si katkılı NB364 numaralı tınlaşım tünelleme diyot yapıları için büyüme doğrultusundaki manyetik alanın tünelleme karakterine etkisi	93
Şekil 5.17 Şekil 5.16'da gösterilen tepe ve vadi değerlerinin oranlarının manyetik alan şiddetine göre değişimi (sol). Manyetik alan ölçümleri için hazırlanan seramik taşıyıcı üzerine yerleştirilen örneklerin fotoğrafı (sağ).....	94

Şekil 5.18 Çift engel tınlaşım tünelleme örnekleri için $60 \times 60 \text{ um}^2$ masatepe boyutlarındaki aygıtların 6 K sıcaklıkta Akım-Voltaj (I-V) ölçüm sonuçları	96
Şekil 5.19 a) NB518, NB516 ve NB517, b) NB518, NB519 ve NB520 kod numaralı örnekleri için voltaja karşı akım türevi grafikleri	97
Şekil 5.20 NB516 kod numaralı örneği için 6 K sıcaklıkta farklı masatepe boyutları için yapılan I-V ölçümlerinden elde edilen voltaja karşılık akımın birinci türevi grafikleri.....	98
Şekil 6.1 6 K sıcaklıkta elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinde Tungsten ışık kaynağı, CaF_2 ışın bölücü, RT-Si Diode (Si D510) dedektör, kreostat için KRS-5 pencereler ve 4mm açıklık kullanılarak atmosfer ve GaAs alttaş için elde edilen geçirgenlik spektrumu	101
Şekil 6.2 6 K sıcaklıkta elektromanyetik spektrumun FIR bölgesinde Global ışık kaynağı, CaF_2 (VIS/NIR T401) ışın bölücü, RT-DTGS FIR (PE/DLaTGS D201) dedektör, kreostat için Polietilen pencereler ve 6mm açıklık kullanılarak atmosfer, GaAs alttaş ve NB317 kod numaralı örnek için elde edilen geçirgenlik spektrumu.....	101
Şekil 6.3 Si ve Be delta katkılı çoklu kuantum kuyu örnekler için düşük sıcaklık ($\sim 6 \text{ K}$) geçirgenlik ölçümleri. Arkaplan referans olarak atmosfer (a) ve yarı-yalıtkan GaAs alttaş (b) kullanılmıştır.....	102
Şekil 6.4 İnceltilmiş çoklu kuantum kuyu ve referans örneklerinin düşük sıcaklıkta FIR bölgede alınan geçirgenlik ölçüm sonuçları	103
Şekil 6.5 Tekrar sayısı arttırılmış çoklu kuantum kuyu ve referans örneklerinin düşük sıcaklıkta FIR bölgede alınan geçirgenlik ölçüm sonuçları	104
Şekil 6.6 Almanya-Dresden'de Ion Beam Physics and Materials Research enstitüsünde Be katkılı örneklerle yapılan düşük sıcaklık geçirgenlik ölçüm sonuçları.....	105
Şekil 6.7 Şekil 6.6'de verilen grafiklerin 14-32 meV bölgesinin büyütülmüş hali.....	106
Şekil 6.8 Tel bağlama işlemine hazır hale getirilen yanal aygıt masatepe yapıların birinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri. Boyutları $104 \times 104 \text{ um}^2$ olana dört adet masatepe (a) ve farklı boyutlara sahip masatepelerin (b) SEM görüntüleri	107

Şekil 6.9 Taşıyıcı paket üzerine sabitlenmiş aygıtların 25 μm kalınlığındaki Au tellerle kontak bölgelerinden taşıyıcı paket pinlerine bağlantısı yapılmış farklı masatepe boyutlarındaki aygıtların fotoğrafı	108
Şekil 6.10 NB319 kod numaralı örneğinin farklı masatepe boyutlarındaki aygıtlarından 80 K sıcaklıkta alınan karanlık akım (a) ve akım yoğunluğu (b) ölçüm sonuçları	108
Şekil 6.11 NB319 kod numaralı örneğinin 200x200 μm^2 boyutlarındaki masatepeden 6 K sıcaklıkta ışık kaynağı olmadan, NIR ve MIR ışık altında alınan akım-voltaj ölçümleri (a). Aydınlatılmış koşulda elde edilen akım değerlerinin aydınlatılmamış akım değerlerine oranı (b).....	110
Şekil 6.12 NB372 kod numaralı örneğinin farklı masatepe boyutlarındaki aygıtlarından 80 K sıcaklıkta alınan karanlık akım (a) ve akım yoğunluğu (b) ölçüm sonuçları	110
Şekil 6.13 NB372 kod numaralı Be katkılı örneğin 200x200 μm^2 boyutlarındaki mastepeden 6 K sıcaklıkta ışık kaynağı olmadan ve NIR ışık altında alınan akım-voltaj ölçüm sonuçları. Akım-voltaj (sol), akım yoğunluğu-voltaj (sağ)	111
Şekil 6.14 NB372 kod numaralı örnekleri için yapılan 200x200 μm^2 masatepe boyutlu aygıtlar üzerinden görünür bölgede yapılan fototepki ölçümleri ile düşük sıcaklık PL ölçüm sonuçlarının karşılaştırması verilmiştir.....	112
Şekil 6.15 Be delta katkılı NB569 kod numaralı süperörgü yapı (a) ile NB570 kod numaralı çoklu kuantum kuyu (b) yapılardan elde edilen aygıtların karanlık akım-voltaj karakteristikleri	113
Şekil 6.16 NB570 kod numaralı Be katkılı örneğin 200x200 μm^2 boyutlarındaki mastepeden 6 K sıcaklıkta ışık kaynağı olmadan, MIR ve NIR ışık altında alınan akım-voltaj ölçüm sonuçları. Akım-voltaj (a), akım yoğunluğu-voltaj (b).....	113

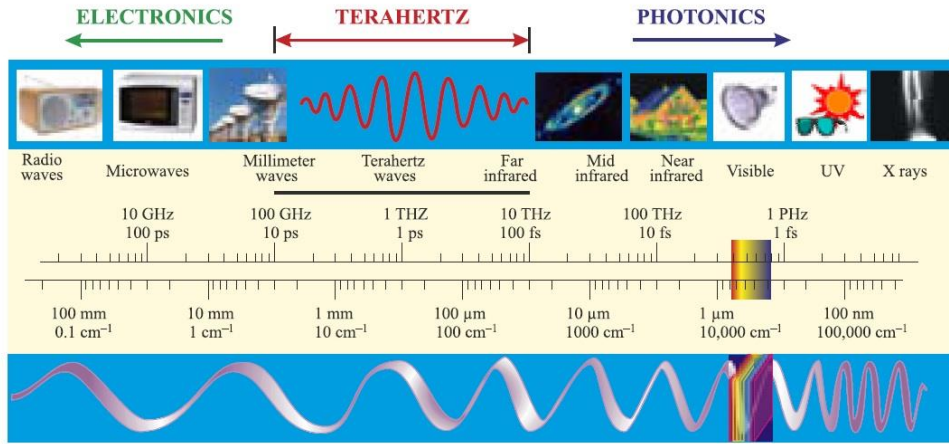
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al	: Alüminyum
Å	: Angstrom
Al_xGa_{1-x}As	: Alüminum Gallium Arsenide (Alüminyum Galyum Arsenik)
Be	: Berilyum
BEP	: Beam Equivalent Pressure (Demet eşdeğer basıncı)
BFM	: Beam Flux Monitor (Demet akı ölçer)
δ	: Delta
E_g	: Yasak bant aralığı enerjisi
E₁	: Kuyu temel enerji seviyesi
em	: Electromagnetic (Elektromanyetik)
FT-IR	: Fourier Dönüşümü Kızılötesi
GaAs	: Gallium Arsenide (Galyum arsenik)
HH₁	: Heavy Hole ground state (ağır boşluk temel enerji seviyesi)
HRXRD	: High Resolution X-Ray Diffraction (Yüksek çözünürlüklü x-ışını kırınımı)
I-V	: Current (I) – Voltage (V) (Akım - Voltaj)
nm	: Nanometre
meV	: Mili elektronvolt
MBE	: Molecular Beam Epitaxy (Moleküler Demet Epitaksi)
MOCVD	: Metalorganic Chemical Vapour Deposition (metalorganik kimyasal buhar biriktirme)

NDF	: Neutral density filter (nötr yoğunluk filtresi)
PL	: Photoluminescence (Fotoluminesans)
Si	: Silisyum
Te	: Tellür
THz	: Terahertz

1. GİRİŞ

Elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölgesi; yakın kızılötesi (NIR), orta kızılötesi (MIR) ve uzak kızılötesi (FIR) olarak üçe ayrılır. Elektromanyetik spektrumun farklı isimlerle adlandırılan dalgaboyu bölgelerinin günümüz teknolojisindeki kullanım alanları Şekil 1.1’de sunulmaktadır. Günümüzde, THz bölge elektromanyetik spektrumun FIR’dan milimetre dalgaboylarına kadar olan kısım olarak tanımlanmaktadır. Elektromanyetik spektrumun THz bölgesi 1000 μm ’den başlayıp 50 μm ’de bitmektedir (0,3-6 THz) [1]. Bu nedenle, bu dalgaboyları genellikle THz, FIR ya da milimetre dalga olarak isimlendirilmektedir.



Şekil 1.1 Elektromanyetik spektrumun farklı bölgelerinin uygulama alanlarıyla birlikte isimlendirmelerinin sunulduğu görsel

Kaynak: [1]

THz elektromanyetik dalgaların tümü, su gibi polar sıvılar tarafından kuvvetlice soğurulur. THz dalgalar kuru, metal olmayan ve polar olmayan nesnelere çoğundan geçebilir. Örnek olarak plastik, kâğıt, mukavva ve karbondioksit, benzen, metan gibi polar olmayan organik bileşikler içeren maddelerden rahatlıkla geçer [2]. Ayrıca düşük enerjisi nedeniyle iyonlaşmaya neden olmaması, canlılar üzerinde rahatlıkla kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bu frekans bandını kullanan aygıtlar insanoğlunun aktiviteleriyle ilgili güvenlik, biyolojik, kimyasal, uyuşturucu ve patlayıcı algılama, gaz sızıntısı algılama ve görüntüleme, tıbbi görüntüleme, medikal uygulamalar, malzeme

karakterizasyonu, yüksek bant genişlikli telekomünikasyon ve astronomi uygulamaları gibi çok çeşitli alanlarda artan bir öneme sahiptir [1-4]. Özellikle astrofizik açısından önemlidir çünkü THz ışıma evrenin parlaklığının (luminosity) yarısına yakını ve büyük patlamadan yayılan fotonların % 98'ini içerir [2].

Bu uygulamalar, yüksek optik güçlü THz kaynaklarla birlikte kompakt ve düşük gürültülü THz yarıiletken dedektörlerin üretimini zorunlu kılmaktadır. THz teknolojiyle birlikte evrim geçiren araştırmalar çok yoğun ilgi görmektedir ve sahip olduğu büyük potansiyelin kullanılabilmesi amacıyla bu bölgede çalışan ışık algılayıcıların ve yayıcıların hayata geçirilmesinde farklı yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi evreyuysuz (noncoherent) olarak tanımlanan doğrudan algılama yapan sistemlerdir. Elektronik olarak algılama yapan bu sistemler sadece sinyal genliğini ölçtüklerinden geniş bant aralığında çalışırlar. Doğrudan THz algılama yapan Golay hücreleri, piroelektrikler (pyroelectric) ve doğrudan ısıl algılama yapan bolometreler ışığı ısıl soğurma yapan küçük bir bölgeye eşleştirmek için anten yaklaşımını kullanırlar [2]. Bu bölgedeki elektriksel direnç değişimi gelen ışık şiddetinin bir göstergesidir. Doğrudan dedektörler içinde düşük sıcaklık bolometreleri en yüksek hassasiyete sahiptirler. Bu dedektörler ölçüm hassasiyetinin çözünürlükten daha önemli olduğu durumlarda kullanılabilirler. THz algılama için bir diğer yaklaşım heterodin (heterodyne) veya eşvreli (coherent) algılayıcılar olarak tanımlanan yüksek tayfsal çözünürlüğe sahip optik yöntemidir. Heterodin algılayıcılar, gelen foton sinyalini yükselterek hem genlik hem de faz bilgisi elde ederler ve bu sayede yüksek çözünürlük sağlarlar. Ancak, daha dar bant aralığına ve belirsizlik ilkesi sonucu kuantum sınırlamalara sahiptirler. Bu dedektörlerde gelen THz sinyal frekansı daha düşük frekanslara (intermediate, IF) dönüştürülür (bu dönüşüm heterodin dönüşüm olarak isimlendirilir) ve bu nedenle yerel salınğaçlara (local oscillators) bağımlıdırlar. İleri beslemeli Schottky engel diyotlar (Schottky barrier diodes, SBDs), süperiletken-yalıtkan-süperiletken (SIS) tünel eklemleri, yarıiletken ve süperiletken sıcak elektron (hot electron) bolometreleri (HEBs) ve süperörgü yapılar heterodin algılayıcılara örnek olarak verilebilir [2]. Bunlar arasında yarıiletken foton dedektörlerinde, gelen ışıma yarıiletken materyal içindeki örgüye ya da safsızlık atomlarına bağlı elektronlar ile etkileşerek soğrulur. Ölçülen elektrik çıkış sinyali aktif malzemedeki elektronik enerji dağılımındaki değişimin göstergesidir. Bu dedektörler dalgaboyuna bağlı seçici tepki

verirler ve iyi sinyal/gürültü oranlarına sahiptirler. Ancak bu yüksek tepki hızını ve düşük gürültü oranını elde edebilmek için kriyojenik soğutmaya ihtiyaç duyarlar.

Yakın zamanda heterodin algılayıcılar arasında kuantum kuyu (quantum well, QW), kuantum nokta (quantum dot, QD) ve özellikle kuantum kademeli (QC) katkılı yarıiletken nano-yapılar büyük gelişme göstermiştir [1,3-4]. Bu gelişimin temel sebebi, moleküler demet epitaksi (molecular beam epitaxy, MBE) ve metal-organik kimyasal buharlı biriktirme (metal-organic chemical vapor deposition, MOCVD) gibi epitaksiyel kristal büyütme tekniklerinin gelişmesiyle yarıiletken nano-yapıların özelliklerinin, katman yapılarının, katkı türü ve miktarlarının farklı şekillerde tasarlanarak istenilen bölge için ayarlanabilmesidir. Ancak kuantum nokta fotodedektör (QDIP) yapıların üretilmesinde tekrar edilebilirlik ve nokta büyüklüğü tekdüzeliğinde net bir standart yakalanamamış olması bu yapıları THz bölgede algılayıcı olarak kullanımını zorlaştırmaktadır. Bunun yanında kuantum kuyu fotodedektörler (QWIP) yapılar genel olarak, kuantum kuyu içi enerji seviyelerinden süreklilik (continuum) seviyelerine dikey geçiş mekanizmasını kullanmasından dolayı, çalışma bölgesini THz bölgeye kadar genişletmek zordur. Ancak QWIP'lerle benzer yapıda fakat tünelleme mekanizmasını kullanan kuantum kademeli ışık yayıcı lazer (QCL) yapılar hem ışık yayıcı hem de algılayıcı yapıların üretimi için önemli yapılardır [5]. Bu yapılar engel katmanlarını aşmak yerine tünelleyerek kuantum kuyu içine girmekte ve yüksek kuantum kuyu enerji seviyeleri arasında geçiş yaparak THz ışımaya yapmaktadır. Engel katmanları popülasyon terslenimini sağlayacak şekilde asimetric olarak tasarlanmaktadır. Yine bu yapılarda boyuna optik fonon geçişlerini kullanan fonon-foton-fonon sıralı geçişleriyle THz yayım yapan yapılar geliştirilmektedir [6].

Bu çalışmada var olan yarıiletken THz dedektör yapılarına alternatif olacak yeni bir yaklaşımla kuantum kuyu içine katkılanan kuantum sınırlı safsızlık atomlarının hidrojen atomu benzeri enerji seviyeleri arasındaki $1s \rightarrow 2p$ dipol izinli geçişlerini temel soğurma mekanizması olarak kullanan algılayıcı yapılar üretilecektir [7-9]. Aslında atom benzeri enerji seviyeleri arasındaki geçişler üç boyutta sınırlı olan kuantum nokta (QD) yapılarda kullanılmaktadır. Ancak kuantum noktaların üretiminde tüm noktaların aynı büyüklükte üretilememesi gibi zorluklar hala aşılamamıştır. Kuantum noktaların fiziksel boyutları enerji seviyelerini doğrudan etkilediğinden bu başlı başına bir zorluk oluşturmaktadır. Bu tez çalışmasında MBE sisteminde büyütülen çoklu kuantum kuyu yapıların kuyu merkezleri veya kuyu içinde tanımlı başka bölgeleri δ -katkılama yöntemi

kullanılarak yüzeysel (planar, sheet) olarak düşük konsantrasyonlu katkılanarak algılayıcı yapılar elde edilecektir. Safsızlık atomlarının bireysel davranıp nötr haldeyken hidrojen enerjisi benzeri enerji seviyelerine sahip olabilmesi için düşük konsantrasyona sahip olmaları gerekmektedir. Bu atomların kuantum kuyu temel enerji seviyesinin altında oluşturdukları 1s, 2p bağlanma enerjileri arasındaki enerji farkı THz frekans aralığına denk gelmektedir. Safsızlık atomlarının kuantum kuyu içindeki konumları, kuantum kuyu genişliği, bariyer yüksekliği ve katkı atomu gibi parametreler değiştirilerek THz bölgeyi seçici bir şekilde tarayacak algılayıcılar tasarlanabilecektir. Ancak gelen THz ışınım ile 1s seviyesinden 2p bant benzeri seviyesine uyarılan taşıyıcıların enerjisi kuyuyu aşmaya yetmeyeceğinden yanıl iletim mekanizması yardımıyla kontak bölgesine taşınması gerekmektedir.

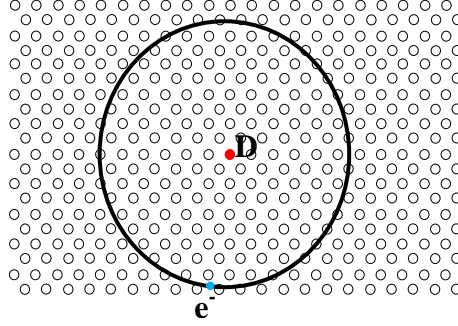
2. KUANTUM SINIRLI SAFSIZLIK ATOMLARI

Günlük hayatta kullandığımız ileri teknoloji ürünlerinin büyük bir çoğunluğu yarıiletken teknolojisine dayanmaktadır. Normal şartlarda yalıtkan olan yarıiletken malzemeler üzerine uygulanan mekanik, elektrik alan ve manyetik alan gibi dışsal etkiler yardımıyla değerlik bandındaki bir kısım elektronlarını serbest bırakarak iletken durumuna geçerler. Hangi durumda ne kadar iletken olacakları içlerinde barındırdıkları taşıyıcı özellikleriyle yakından ilişkilidir. Bu durum yarıiletken kristallerinin içinde bulunan safsızlık atomlarının özelliklerinin elde edilecek aygıtların performanslarını doğrudan etkileyeceği gerçeğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, yarıiletkenleri katkılama için kullanılan safsızlık atomlarının özellikleri deneysel ve teorik olarak çokça çalışılmıştır. Özellikle moleküler demet epitaksi (MBE, molecular beam epitaxy) ve metalorganik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD, metalorganic chemical vapour deposition) gibi çok hassas epitaksiyel kristal büyütme ve katkılama teknolojilerinin gelişmesi bu malzemelerin işlevselliğini daha da arttırmıştır.

Bu çalışmada, birbirlerine etki etmeyecek kadar uzak, izole olmuş safsızlık atomlarının yarıiletken içine yerleştirilmesi ve bu atomların nötr haldeki özellikleri kullanılarak THz bölgede çalışan algılayıcıların üretimi amaçlanmıştır. Bu bölümde, tek kristal yarıiletken içindeki safsızlık atomlarının durumlarından detaylı olarak bahsedilerek sonraki bölümlerde anlatılacak olan özel katkılama teknikleri ve karakterizasyon yöntemlerinin altyapısı oluşturulacaktır. Safsızlık atomlarının külçe yarıiletken içindeki durumlarından başlanarak bir boyutta sınırlandırılmalarının etkileri hakkında yapılmış çalışmalarla konu özetlenecektir.

Saf (katkısız) bir yarıiletken, normal şartlar altında aktif taşıyıcılardan (elektron veya boşluk (hole)) yoksundur yani kristaldeki bütün atomlar bağlarını yaptıktan sonra boşta elektronları kalmamaktadır. Ancak bu yarıiletken içine bağlarını yaptıktan sonra nötr haldeyken fazladan elektronu kalan (donor-verici malzeme) veya boşta bağı kalan (elektrona ihtiyaç duyan acceptor-alıcı malzeme) atomlar yerleştirildiğinde bu yarıiletkenler katkılı hale gelmiş olur. Nötr haldeki bu atomların külçe yarıiletken içinde serbest kalan elektronun durumunu Hidrojen atomundaki proton-elektron çiftinin durumuna benzetebiliriz. Hidrojen atomu için elektronun bağlanma enerjisi çok iyi

bilinmektedir [10-11]. Verici atomuyla yarıiletken içinde serbest kalan elektronun durumu Şekil 2.1’de temsili olarak verilmiştir [12].



Şekil 2.1 Külçe yarıiletkendeki verici atomunun temsili gösterimi

Kaynak: [12]

Külçe yarıiletken içindeki nötr verici atomları ile elektronun bağlanma enerjisi

$$E_{D^0} = -\frac{m_e^* e^4}{32\pi^2 \hbar^2 \epsilon_r^2 \epsilon_0^2} \quad (2.1)$$

ve Bohr yarıçapı

$$a_0 = \frac{4\pi \hbar^2 \epsilon_r \epsilon_0}{m_e^* e^2} \quad (2.2)$$

denklemleriyle verilir [12]. Burada m_e^* elektronun etkin kütlesi, e elektronun yükü, $\hbar = h/2\pi$ indirgenmiş Plank sabiti, ϵ_r yarıiletken malzemenin dielektrik sabiti ve ϵ_0 boş uzayın elektriksel geçirgenliğidir. Hidrojen atomu benzetimi alıcı atomları (acceptor) için de yapabiliriz. Denklem (2.1) ve (2.2)’de elektron etkin kütlesi yerine boşluk (hole) etkin kütlesini yazmak $m_e^* \rightarrow m_h^*$ yeterli olacaktır. Alıcı atomları için,

$$E_{A^0} = -\frac{m_h^* e^4}{32\pi^2 \hbar^2 \epsilon_r^2 \epsilon_0^2} \quad (2.3)$$

ve Bohr yarıçapı

$$a_0 = \frac{4\pi \hbar^2 \epsilon_r \epsilon_0}{m_h^* e^2} \quad (2.4)$$

denklemleri elde edilir [12]. Bu denklemlerdeki malzeme parametreleri olan m_e^* elektron etkin kütlesi ve ϵ_r yarıiletken malzemenin dielektrik sabiti olduğundan bağlanma enerjisi ve Bohr yarıçapı safsızlık atomlarından bağımsızdır. Yarıiletken

teknolojisinde çokça kullanılan GaAs malzemesi için Γ -vadisi elektron etkin kütlesi $m_e^* = 0,067m_e$ (m_e elektronun kütlesi) ve statik dielektrik sabiti olan $\epsilon_r = 13,18$ değerleri kullanılarak örnek bir hesaplama yapıldığında bağlanma enerjisi 5,3 meV ve Bohr yarıçapı 103 Å elde edilir. Şekil 2.1'de şematik olarak gösterildiği gibi 103 Å çapındaki bir hacim içinde basit bir hesaplamayla on binlerce atom kalmaktadır.

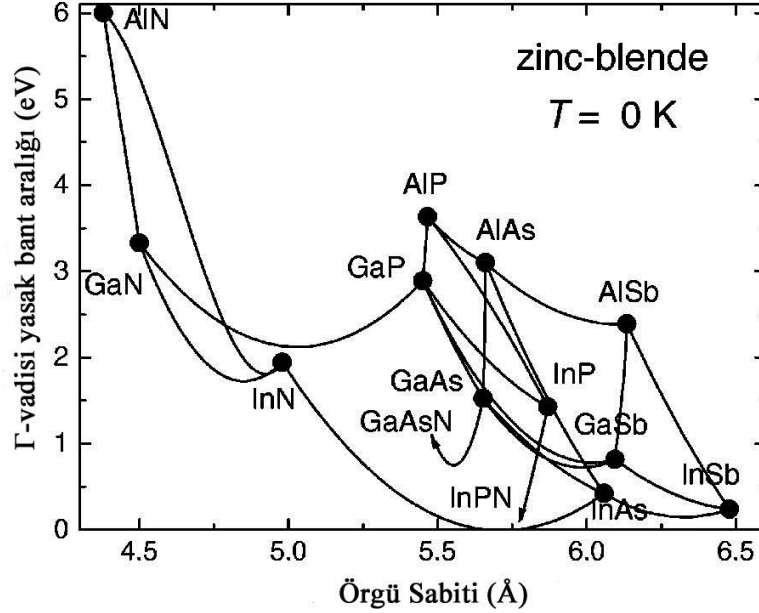
Bu benzetim yönteminden yola devam edilecek olursa hidrojen atomu uyarılmış enerji seviyeleri için geçerli olan $E_n = E_1/n^2$ (n temel kuantum numarası) bağıntısı kullanılabilir. Burada temel enerji seviyesi 1s ve uyarılma enerji seviyesi $2p_{\pm}$ olarak benzer şekilde isimlendirilebilir. Safsızlık atomlarının bant yapısı içinde yeni enerji seviyeleri oluşturmadan tek başlarına (birbirleriyle etkileşmeden) yani kuantum nokta gibi davranmaları bu çalışma için çok önemlidir. Safsızlık atomlarının birbirlerine Bohr yarıçapından daha yakın olacak kadar çok katkılanmaları, bu enerji seviyelerinin bant yapısına dönüşmesine neden olurken çok az katkılanmaları ölçümlerini imkânsız hale getirecektir.

Kuantum sınırlı safsızlık atomlarının özelliklerine geçmeden önce bu çalışmada kullanılacak olan GaAs/ $Al_xGa_{1-x}As$ kuantum kuyu yapılar üzerinden kuantum kuyuların özelliklerine değinilecektir. Sonraki bölümde kuantum kuyu içinde bir boyutta sınırlandırılan safsızlık atomlarının özellikleri irdelenecektir.

2.1. GaAs/ $Al_xGa_{1-x}As$ Kuantum Kuyu Yapılar

Yüzey merkezli kübik (çinko-sülfür) kristal yapısındaki III-V yarıiletken malzemeler için Şekil 2.2'de 0 K sıcaklıktaki kristal örgü sabitlerine karşılık Γ -vadisi yasak bant aralığı verilmiştir. Özellikle kristal büyütme teknikleri açısından göreceli olarak kolay çalışılan GaAs ve onunla örgü uyumuna sahip AlAs malzemeleri, yarıiletken teknolojisinde çok önemli bir yere sahiptir. Bu nedenle, kuantum kuyu yapıların GaAs/Al(Ga)As malzeme sistemiyle epitaksiyel olarak görece kolay büyütülmesi bir başka avantajıdır. Ancak yüksek kristal kalitesi için AlAs'ın yüksek sıcaklıklarda büyütülmesi gerekir [13-14], düşük sıcaklıkta büyütülen AlAs/GaAs malzeme sisteminin arayüz kusurları fazladır [13,15] ve doğrudan olmayan (indirect) Γ -vadisi yasak bant yapısına sahiptir [16]. Bu nedenlerden dolayı $x \leq 0,4$ alaşım oranlarında doğrudan bant yapısındaki [16] $Al_xGa_{1-x}As$ 'in engel malzemesi olarak

kullanılması tercih sebebidir. $Al_xGa_{1-x}As$ için 300 K sıcaklıktaki x alaşım oranına bağlı Γ -vadisi yasak bant aralığı eV cinsinden Denklem 2.5’de deneye dayalı elde edilmiş formülüyle verilmektedir.



Şekil 2.2 0 K sıcaklıkta zinc blende kristal yapısındaki III-V malzemeleri için ikili (noktalar) ve üçlü (çizgiler) bileşiklerin örgü sabitlerine karşılık Γ -vadisi yasak bant aralık enerjisi

Kaynak: [16]

$$E_g(AlGaAs) = 1,424 + 1,247x \quad ; \quad x < 0,45$$

$$E_g(AlGaAs) = 1,9 + 0,125x + 0,143x^2 \quad ; \quad x > 0,45 \quad (2.5)$$

Al alaşım oranına ($x \leq 0,7$) ve özellikle sıcaklığa bağlı Γ -vadisi yasak bant aralığı için daha genel olan Denklem 2.6’yı kullanmak gerekecektir [17].

Bu iki malzeme Şekil 2.3’te gösterildiği gibi bir araya getirildiğinde, yasak bant aralığı küçük olan GaAs tabaka kuantum kuyu olarak davranmaktadır. Ancak $E_g(AlGaAs) - E_g(GaAs)$ farkı değerlik bandı ve iletim bandı arasında farklı dağılmaktadır. Bu farkın % 65’lik kısmı iletim bandına ve % 35’lik kısmı değerlik bandına geçmektedir [16]. Şekil 2.3’de gösterilen $Al_xGa_{1-x}As$ engel katmanlarının ve GaAs kuyu katmanlarının bant yapısı şematik olarak verilmiştir. Kuantum kuyu

genişliğinin değişmesi, değerlik bandındaki ve iletim bandındaki kuantum kuyu içi enerji seviyelerini ($E_1, E_2, HH_1, LH_1, vb.$) doğrudan etkilemektedir. Benzer şekilde $Al_xGa_{1-x}As$ malzemesinin alaşım oranı x 'e bağlı olarak, engel yüksekliği yani sınırlandırma potansiyeli değişmekte ve bu da kuantum kuyu enerji seviyelerini değiştirmektedir. Engel genişliği ise kuantum kuyu enerji seviyeleri üzerinde doğrudan bir etkiye sahip değildir. Ancak engel genişliğinin x alaşım oranına bağlı olarak belli bir kalınlığın altına inmesi ardışık kuantum kuyularındaki taşıyıcıların dalga fonksiyonlarının birbirlerini etkilemesine neden olmakta ve kuantum kuyulardaki enerji seviyeleri yerine enerji bantları oluşmasına neden olmaktadır. Bunlar, “süperörgü” yapılar olarak bilinirler [12].

$$E_g^r(t, x) = \frac{A(T) + B(T)x + Cx^2}{D(T) + Ex}$$

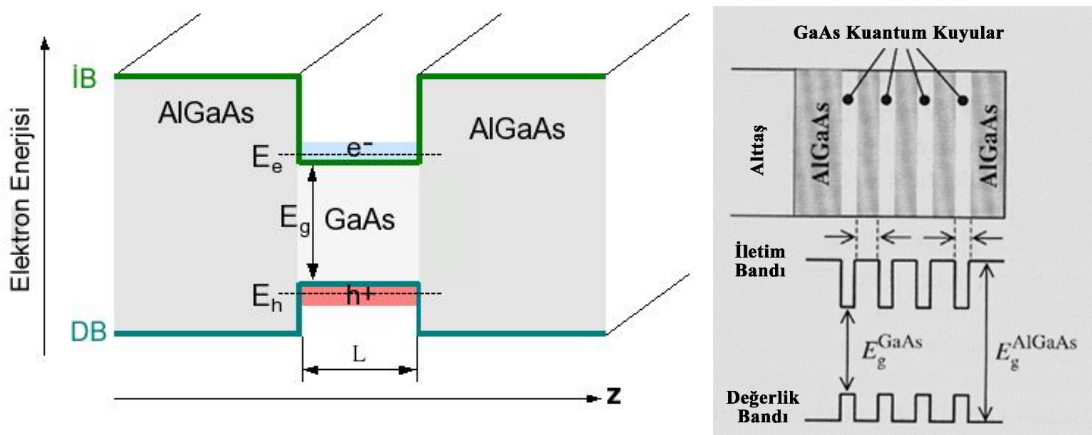
$$A(T) = 341,87 + 1,5194T - 5,510^{-4}T^2 \text{ (eV K)}$$

$$B(T) = 466,71 + 1,48T - 3,310^{-4}T^2 \text{ (eV K)}$$

$$C = 130,24 \text{ (eV K)}$$

$$D(T) = 225 + T \text{ (K)}$$

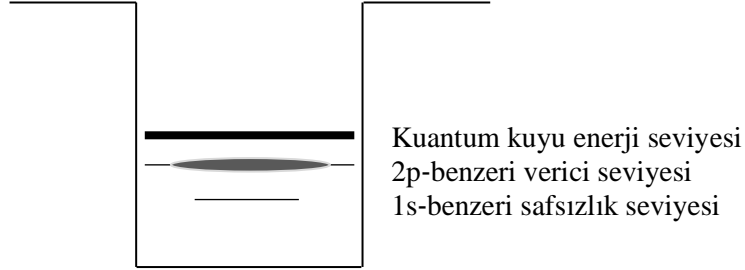
$$E = 88 \text{ (K)} \tag{2.6}$$



Şekil 2.3 $GaAs/Al_xGa_{1-x}As$ kuantum kuyu sisteminin temsili bant yapısı.

2.2. Kuantum Sınırlı Safsızlık Atomlarının Özellikleri

Verici atomlarının bir kuantum kuyu içine yerleştirilmesi, Şekil 2.4’de şematik olarak gösterildiği gibi kuyu içindeki ilk altbandın altında mevzilenmiş 1s benzeri temel ve $2p_{\pm}$ bant benzeri enerji seviyelerinin oluşmasını sağlar. Kuantum kuyularındaki bir boyutta sınırlamanın etkisiyle ortaya çıkan bu durum yukarıda bahsedilen külçe yarıiletkendeki duruma kıyasla çok daha karışıktır. Örneğin, sınırlama etkisini değiştirdiği için kuantum kuyu genişliğinin değişmesi, bağlanma enerjilerini de değiştirir. Dolayısıyla, tek kuantum kuyu yerine, birbiriyle etkileşen daha fazla sayıda kuantum kuyusunun kullanıldığı yapılarda veya süperörgülerde bu bağlanma enerjisi daha farklı olacaktır. Şekil 2.5’de şematik olarak gösterildiği gibi, kuantum kuyunun genişliğine bağlı olarak safsızlık atomlarının dalga fonksiyonları değişir, ayrıca bu safsızlık atomlarının kuantum kuyu içindeki konumlarına göre de dalga fonksiyonları yani bağlanma enerjileri değişir. Bu bağlanma enerjileri birkaç meV’den başlayıp 100 meV değerlerine kadar çıkabilir.

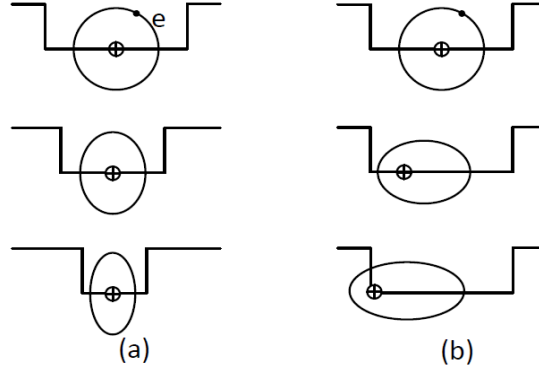


Şekil 2.4 Kuantum kuyu içindeki safsızlık (verici) atomlarının sınırlanmış enerji seviyelerinin şematik gösterimi.

Verici atomları için bu söylenenler, p-tipi alıcı (acceptor) atomları için de geçerlidir. Bu durumda daha önceden bahsedildiği gibi Denklem 2.1 ve 2.2’deki elektronun etkin kütlesi yerine boşluğun etkin kütlesi kullanılmalıdır. Ancak bu durumda daha karmaşık olan değerlik bandı düşünülmelidir. Değerlik bandının $\Gamma = 0$ noktasında enerjilerin dejenere olması hafif ve ağır boşlukların eş zamanlı olarak düşünülmesini gerekli kılmaktadır.

Kuantum kuyulu yapılarda bu dejenere durum ortadan kalksa bile, değerlik bandının genel karmaşıklığı durumun zorluğunu ortadan kaldırmaz. Ayrıca, boşluk etkin kütlesi,

elektronunkine kıyasla çok daha büyük olduğundan, alıcı atomları için boşlukların Bohr yarıçapı daha küçüktür.



Şekil 2.5 Kuantum kuyu içindeki verici atomların dalga fonksiyonuna (a) kuyu genişliğinin, (b) verici atomlarının konumlarının etkisinin şematik gösterimi

Kaynak: [12]

Külçe yarıiletken malzemelerdeki safsızlık atomlarının iyi bilinen özellikleri yardımıyla özellikle kuantum kuyu gibi yapıların içine hapsedilen safsızlık atomlarının davranışları ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. Kuantum kuyu içindeki sınırlandırılmış safsızlık atomlarının bağlanma enerjilerinin kuyu genişliği ve katkı atomlarının kuyu içindeki konumlarına bağlı değişimi ilk olarak Bastard tarafından kuramsal olarak çalışılmıştır [18]. GaAs/AlGaAs malzeme sisteminde alıcı ve verici atomları için ve InAs/GaSb süperörgü yapılarında ise alıcı atomları için bağlanma enerjileri kullanılmıştır.

Greene ve Bajaj, Bastard'ın yaptığı çalışmayı temel alarak bağlanma enerjisinin engel potansiyelinin de (AlGaAs) fonksiyonu olarak hesaplamışlardır [19]. Bu çalışmada safsızlık atomlarının temel enerji seviyesi ile birlikte ilk dört uyarılma enerji seviyelerinin de kuyu genişliğiyle değişimini ortaya koymuşlardır. Yaptıkları başka bir çalışmayla [20], aynı malzeme sistemi için katmanlara dik olarak uygulanan manyetik alanın, kuyu genişliğine bağlı olarak 1s ve 2p-benzeri enerji seviyeleri üzerindeki etkileri teorik olarak incelenmiştir.

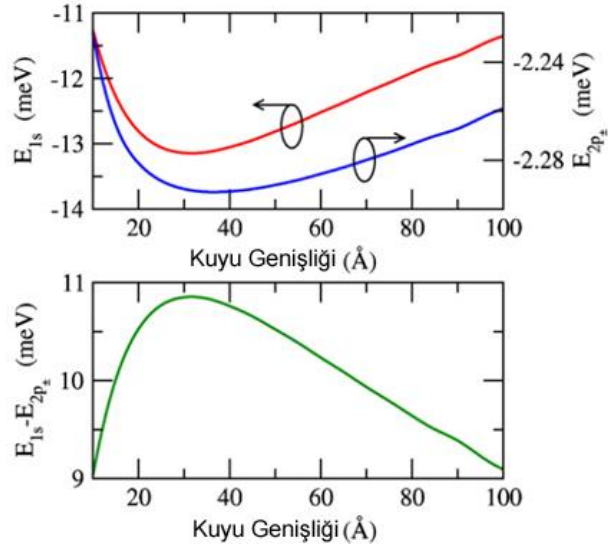
Masselink ve ark. tarafından da $Al_xGa_{1-x}As$ malzeme sisteminde alıcı atomları için değişimli hesaplama yöntemiyle (variational method) benzer çalışmalar yapılmıştır [21-

22]. Bu hesaplamalarda farklı olarak elektrik alan, manyetik alan ve tek eksenli stresin değerklik bandındaki enerji seviyeleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Benzer kuramsal çalışmalar farklı gruplar tarafından alıcı atomları için yapılmıştır [23-24]. Bunlardan Cheng ve McCombe manyetik alanın etkileriyle birlikte dipol izinli geçişleri de çalışmışlardır [24].

AlGaAs/GaAs malzeme sistemi üzerinden safsızlık atomlarının varlığı farklı deneysel yöntemlerle gösterilmiştir [25-39]. Bu deneysel yöntemlere fotoluminesans [25-27], Raman saçılması [29-30] ve uzak kızılötesi soğurma ölçümleri [30-35] örnek olarak verilebilir. Bunlara ek olarak kuyu içindeki safsızlık seviyeleri üzerinden tınlaşım tünelleme deneyleri de yapılmıştır [36-39]. Aslan ve ark. 2007 yaptığı çalışmayla tınlaşım tünelleme diyot yapısı kullanılarak manyetik alanın 1s ve 2p enerji seviyeleri arasındaki farkı değıştirdiğı akım-voltaj ölçümlerinde gösterilmiştir [40].

2.2.1. Kuantum kuyu genişliğinin safsızlık atomlarının bağlanma enerjilerine etkisi

Sınırlama potansiyelini değıştirdiğinden, kuyu genişliğinin değışimi kuantum kuyu içinde sınırlandırılan safsızlık atomlarının 1s ve 2p_± bağlanma enerjilerini değıştirir [12,18]. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi kuyu genişliğinin azalmasıyla bağlanma enerjisinin artışı monotonik değildir ve belli bir kritik kalınlıktan küçük kuyu genişliklerinde bağlanma enerjisi tekrar azalmaktadır [41]. Bunun sebebi kuantum kuyunun genişliği azaldıkça sınırlama taşıyıcılar üzerindeki sınırlama potansiyeli artar ve kuyu içi enerji seviyelerinin enerjisi de artar. Dolayısıyla taşıyıcılar kuyunun üstüne doğru itilmekte ve bağlanma enerjileri azalmaktadır. Ters durumda yani kuantum kuyunun çok geniş olması durumunda da safsızlık atomlarının bağlanma enerjileri külçe malzeme içindeki değerlerine yaklaşacak şekilde azalmaktadırlar. Şekil 2.6'da kuantum kuyunun çok dar veya çok geniş olması durumlarında safsızlık atomlarının bağlanma enerjilerinin külçe malzeme içindeki bağlanma enerji değerlerine yaklaştığı görülmektedir.



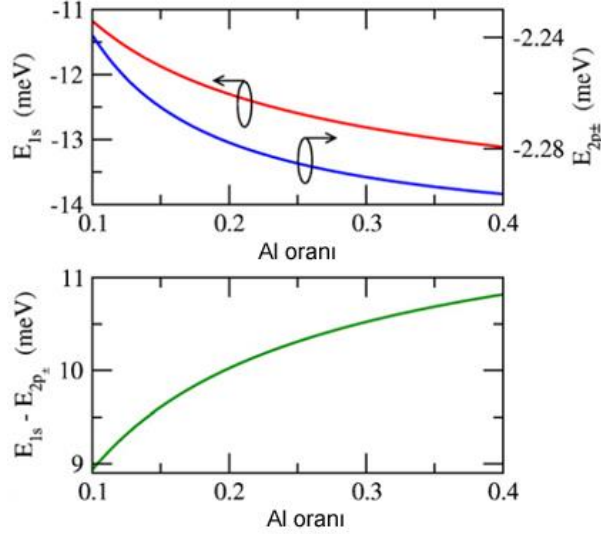
Şekil 2.6 *GaAs/Al_{0,3}Ga_{0,7}As malzeme sistemi için yinelemeli shooting algoritmasıyla hesaplanan kuantum kuyu merkezindeki safsızlık atomlarının kuyu genişliğine bağlı olarak (a) 1s (kırmızı) ve 2p_± (mavi) bağlanma enerjilerinin (b) 1s-2p_± enerji farkının değişimini veren grafik*

Kaynak: [41]

2.2.2. Engel yüksekliğinin safsızlık atomlarının bağlanma enerjilerine etkisi

Kuantum kuyuyu oluşturan engel yüksekliği, safsızlık atomlarının sınırlama potansiyelini de değiştirdiği için 1s ve 2p_± bağlanma enerjileri de değişir. Şekil 2.7’de kuantum kuyu genişliği sabit tutularak engel yüksekliği değişimine bağlı safsızlık atomlarının bağlanma enerjilerindeki değişim yinelemeli *shooting* yöntemiyle hesaplanarak elde edilen sonuçlar verilmiştir [41]. Al_xGa_{1-x}As malzemesinin x alaşım oranı arttırılarak AlAs’a yaklaştıkça yasak bant aralığı büyümekte ve bu da engel potansiyelini arttırmaktadır. Ancak yüksek alaşım oranlarına çıkıldıkça, GaAs/Al_xGa_{1-x}As malzeme sisteminin epitaksiyel büyütme parametreleri değişmektedir. Yüksek kristal kalitesine sahip GaAs/AlAs malzemeler görece olarak yüksek sıcaklıklarda büyütülmesi gerekmektedir [13-14,42]. Yüksek büyütme sıcaklıkları safsızlık atomlarının difüzyonunu arttıracığından görece olarak düşük sıcaklıklarda büyütme yapılması gerekmektedir [43-47]. Bu durumda da GaAs/AlAs arayüz ve yüzey pürüzlülüğüne neden olacak ve bunları gidermek için ara yüzlerde dakika mertebesinde büyütme durdurmak gibi teknikler kullanmak gerekecektir [15,42]. Büyütme süresini

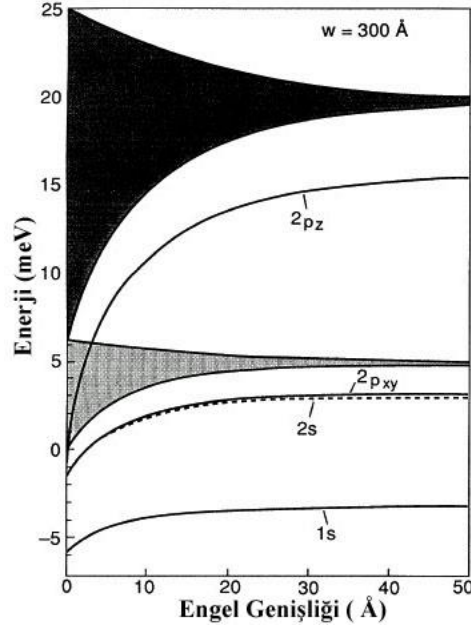
uzatacak olan bu durum zamana bağılı olarak safsızlık atomlarının difüzyonu arttıracaktır [43-44].



Şekil 2.7 *GaAs/Al_{0,3}Ga_{0,7}As malzeme sistemi için yinelemeli shooting algoritmasıyla hesaplanan kuantum kuyu merkezindeki safsızlık atomlarının engel yüksekliğine bağlı olarak (a) 1s (kırmızı) ve 2p± bağlanma enerjilerinin (b) 1s-2p± enerji farkının değişimini veren grafik*

Kaynak: [41]

Daha önce bahsedildiği gibi, safsızlık atomlarının kuantum nokta gibi davranabilmeleri için aralarındaki mesafenin Bohr yarıçapından daha büyük olması gerekmektedir. Aksi takdirde özellikle çoklu kuantum kuyu yapılarında bu enerji seviyeleri enerji bantlarına dönüşmektedir [48-50]. Şekil 2.8’de kuantum kuyu merkezleri delta katkılı çoklu kuantum kuyu süperörgülerin kuantum kuyu genişliği sabit tutularak engel genişliğine bağlı olarak teorik hesaplama sonuçlarından elde edilen enerji mini bant oluşumu verilmiştir [48]. Azalan engel genişliği durumunda verici atomlarının dalga fonksiyonları diğer kuyulara yayılarak diğer safsızlık atomlarıyla etkileşirler ve bu durum bağlanma enerjilerinin azalması ile birlikte enerji bantı oluşumuna neden olur.



Şekil 2.8 *GaAs/Al_xGa_{1-x}As malzeme sistemi için 300 Å sabit kuyu genişliğindeki süperörgülerde engel genişliğine bağlı olarak enerji bant oluşumunu veren hesaplama sonuçları*

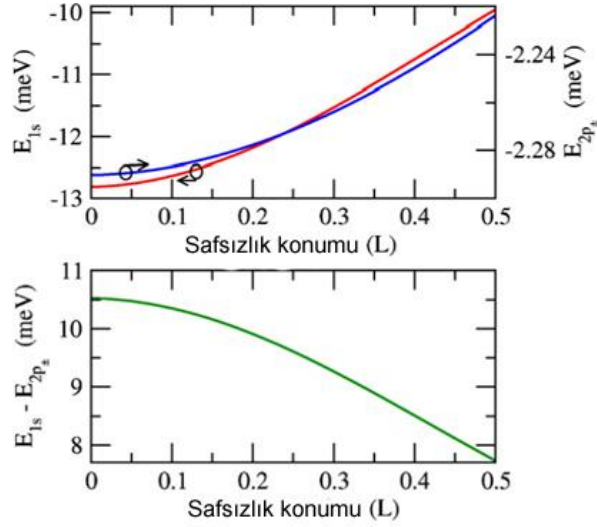
Kaynak: [48]

2.2.3. Kuantum kuyu içindeki safsızlık atomlarının konumlarının bağlanma enerjilerine etkisi

Safsızlık atomlarının kuantum kuyu içindeki konumuna bağlı olarak dalga fonksiyonları değişeceğinden safsızlık atomlarının 1s ve 2p_± bağlanma enerjileri de değişir. 1s enerji seviyesi bu durumdan 2p_± enerji seviyesine göre daha çok etkilenir. Bu nedenle safsızlık atomlarının kuantum kuyu içindeki konumlarına bağlı olarak 1s-2p_± enerji farkı önceki durumlara kıyasla daha fazla değişir. Şekil 2.9'de sabit kuantum kuyu genişliği ve engel yüksekliğine bağlı olarak safsızlık atomlarının bağlanma enerjilerinin kuyu içindeki konumuna göre değişimi verilmektedir [41]. Burada kuantum kuyu genişliği L ve safsızlık atomlarının konumu z_i'ye bağlı olarak z_i/L şeklinde normalize edilerek verilmektedir. Bu durumda 0 değeri kuantum kuyunun merkezini ve ±0,5 konumları ise kuantum kuyunun kenarlarını temsil etmektedir.

Safsızlık atomlarının kuyu içinde bağlanma enerjilerinin en büyük oldukları konum kuyunun orta noktasıdır; 1s ve 2p_± bağlanma enerjileri kuyu kenarlarına doğru gidildikçe azalır. Bu etkiden dolayı safsızlık atomlarının kuantum kuyunun içinde geniş

bir bölgeye dağılması, kuantum kuyu içinde tanımlı tek bir enerji seviyesinin değil bir enerji dağılımının oluşmasına sebep olur. Bu durum, tez kapsamındaki çalışmalar için istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle, safsızlık atomları kuantum kuyunun içine çok az bir dağılım gösterecek şekilde özel bir katkılama tekniği olan ve deneysel yöntemler bölümünde detaylı olarak anlatılan delta (δ) katkılama tekniğiyle yapılmaktadır.



Şekil 2.9 *GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As malzeme sistemi için yinelemeli shooting algoritmasıyla hesaplanan 50 Å kuantum kuyu genişlikli sistem için safsızlık atomlarının kuyu içindeki konumlarına bağlı olarak (a) 1s (kırmızı) ve 2p± (mavi) bağlanma enerjilerinin (b) 1s-2p± enerji farkının değişimini veren grafik*

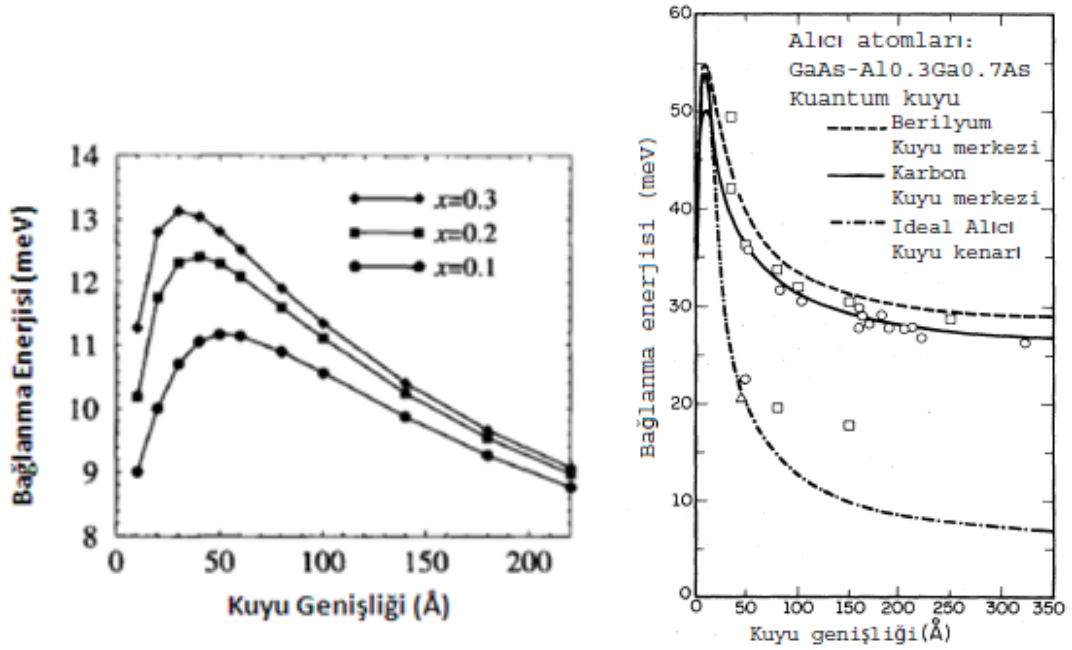
Kaynak: [41]

2.2.4. Safsızlık tipinin safsızlık atomlarının bağlanma enerjilerine etkisi

Safsızlık atomlarının n-tipi ve p-tipi olmasına bağlı olarak safsızlık atomlarının bağlanma enerjileri değişmektedir [12,20]. Yapılan birçok kuramsal [12,18-23,32,34] (alıcı atomları için [18,21-23] ve verici atomları için [18-20,32]) ve deneysel [22-22,24-33,35] (alıcı atomları için [21-22,26-27,29,31,33,35] ve verici atomları için [24-25,28,30,32]) çalışmada bu durum ortaya koyulmuştur. Şekil 2.10 (a)'da kuyu merkezinde konumlu verici atomlarının farklı Al alaşım oranları için kuyu genişliğinin fonksiyonu olarak hesaplanan bağlanma enerjileri görülmektedir [22]: 50Å kuantum kuyu genişliği ve % 30 Al alaşım oranına sahip engel yüksekliği için bağlanma enerjisi

12,8 meV olarak elde edilmektedir. Şekil 2.10 (b)'de % 30 Al alaşım oranına sahip engel yüksekliği için kuantum kuyu merkezi Berilyum (Be) ve Karbon (C) alıcı safsızlık atomlarıyla katkılanan yapıda kuantum kuyu genişliğine bağlı olarak safsızlık atomlarının bağlanma enerjileri kuramsal ve deneysel olarak sunulmuştur [22]: 50Å kuyu genişliği için Be safsızlık atomlarının bağlanma enerjisi 39,6 meV olarak belirlenirken C atomları için bu değer 35,9 meV'dur. Safsızlık atomlarının türüne bağlı olarak bağlanma enerjileri değişmektedir.

Sonuç olarak, farklı tür safsızlık atomları kullanılarak, safsızlık atomlarının kuantum kuyu içindeki konumu, kuyu genişliğini ve engel yüksekliği değiştirilerek kabaca 1-100 meV bölgesinde çalışabilecek aygıtlar üretilebilme potansiyeli vardır.



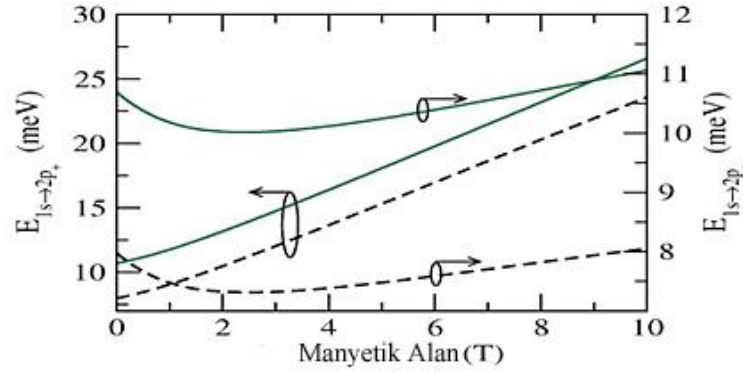
Şekil 2.10 (a) Verici atomları için kuyu genişliğine ve engel yüksekliğine bağlı olarak bağlanma enerjisi değişimi (b) Al_{0.3}Ga_{0.7}As engel yüksekliği için alıcı atomlarının kuyu genişliğine bağlı olarak bağlanma enerjisi değişimi

Kaynak: (a) [12], (b) [22]

2.2.5. Manyetik alanın safsızlık atomlarının bağlanma enerjisine etkisi

Kuantum kuyuda ilk enerji seviyesinin altında safsızlık atomlarından kaynaklı oluşan yeni enerji seviyeleri, kuantum kuyularını oluşturan katmanlara dik yönde

uygulanan manyetik alandan farklı şekilde etkilenir; böylece, bu enerji seviyeleri arasındaki fark da manyetik alanın etkisiyle değişir. Dejenere durumda olan $2p_{\pm}$ enerji seviyeleri manyetik alanla birlikte ayrışır. $1s$ ve $2p_{-}$ bağlanma enerji seviyelerinin manyetik alandan $2p_{+}$ seviyesinden daha az etkilendiği deneysel ve kuramsal çalışmalarda gösterilmiştir [24,51]. Şekil 2.11’de 50 \AA kuantum kuyu (GaAs) genişliği ve % 30 Al konsantrasyonuna sahip engel malzemesi için kuantum kuyunun merkezindeki (yeşil) ve kuyu kenarındaki (kesikli) safsızlık atomları için büyütme doğrultusunda uygulanan manyetik alanın $1s \rightarrow 2p_{-}$ ve $1s \rightarrow 2p_{+}$ geçişlerine etkisi gösterilmiştir [41]. Safsızlık atomlarının kuantum kuyunun içindeki konumu manyetik alan altında bir fark yaratmamaktadır.



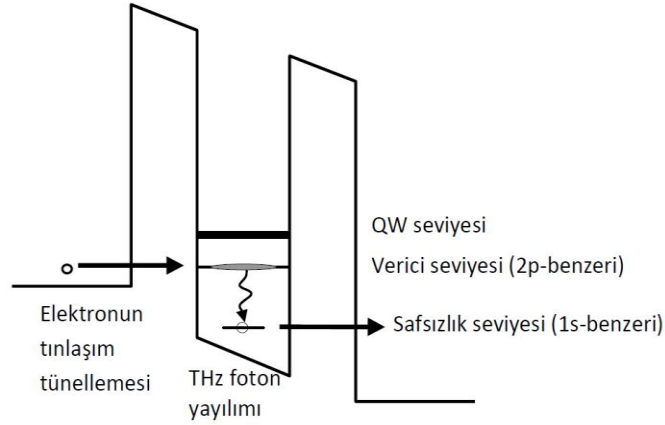
Şekil 2.11 *GaAs/Al_{0,3}Ga_{0,7}As malzeme sistemi için yinelemeli shooting algoritmasıyla hesaplanan 50 \AA kuantum kuyu genişlikli sistem için safsızlık atomlarının manyetik alan altında bağlanma enerjileri ve bu enerjiler arasındaki farkın değişimini veren grafik. Yeşil çizgiler kuantum kuyu merkezindeki ve kesikli çizgiler kuantum kuyu kenarındaki safsızlık atomlarının durumlarını temsil etmektedir.*

Kaynak: [41]

2.3. Tınlaşım Tünelleme Yapılar ve Safsızlık Atomları

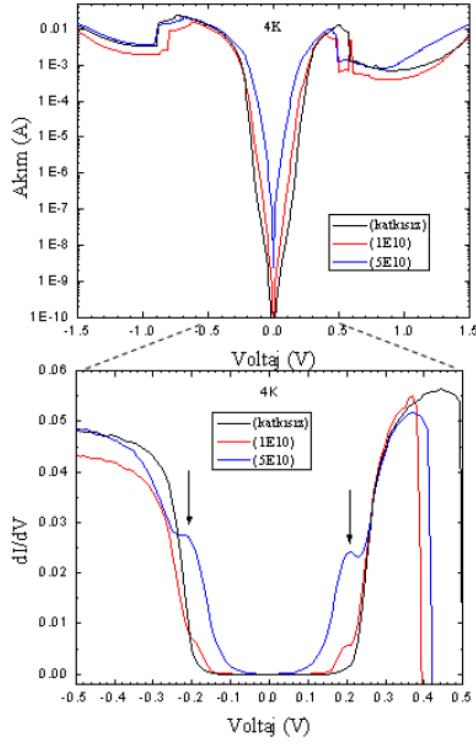
Bağlanma enerjileri yukarıda bahsedildiği şekilde ayarlanabilen kuantum kuyu içindeki safsızlık atomlarındaki dipol izinli $1s \rightarrow 2p_{\pm}$ geçişleri aygıt uygulamalarında kullanılabilir. Şekil 2.12’de gösterilen çift engelli bir kuantum kuyu tınlaşım (rezonans) tünelleme diyot yapısı verici destekli tünelleme işleminde, dışarıdan uygulanan voltajın

etkisiyle kuantum kuyu içindeki 2p-benzeri safsızlık seviyesi, elektronların bulunduğu bölgeyle aynı hizaya gelir. Uygulanan bu voltaj değeri, kuantum kuyusunun temel enerji seviyesinin tınlaşımı için gerekenden daha düşüktür. Bu durumda elektronlar, Şekil 2.12’de gösterildiği gibi altbantlar arası geçiş yaparak ($2p_{\pm} \rightarrow 1s$) foton yayarlar. Çift engelli bir kuantum kuyu tınlaşım tünelleme diyot yapısı, kuyu genişliği, safsızlık atomlarının miktarı ve safsızlık atomlarının kuyu içindeki konumları ile ilgili bilgi vermesi açısından da δ -katkılama çalışmaları için kolaylık sağlamaktadır.



Şekil 2.12 Tınlaşım (rezonans) tünelleme diyot içindeki safsızlık durumları kullanılarak THz ışınım üretiminin şematik gösterimi.

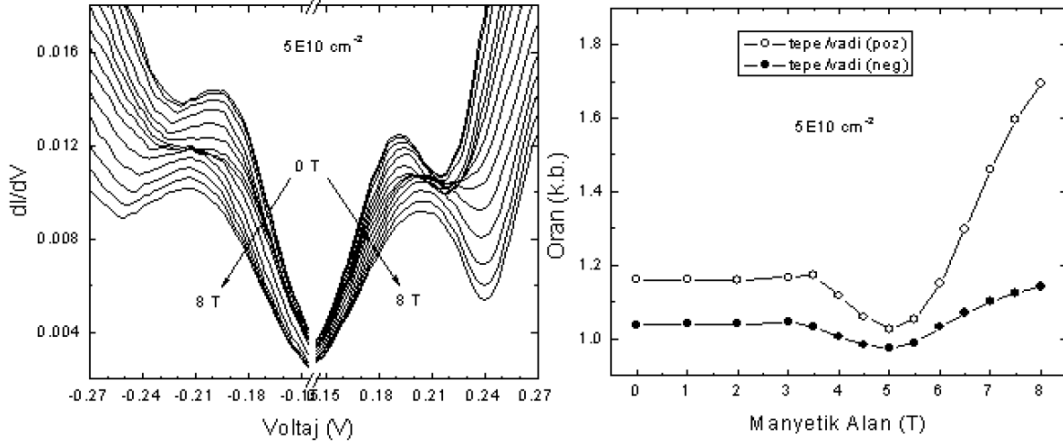
Tınlaşım tünelleme diyot yapıları üzerinden safsızlık atomlarının gözlenmesi için yapılan çalışmalarda temel olarak çift engelli diyot yapısını kullanılmaktadır [36-40,52-57]. Aslan ve ark. yaptığı çalışmada, MBE ile büyütülmüş n-tipi (Si) AlGaAs/GaAs/AlGaAs ve MOCVD ile büyütülmüş p-tipi AlAs/GaAs/AlAs çift engel tınlaşım tünelleme diyotları incelenmiş ve her iki örnekte de safsızlık atomları üzerinden gerçekleşen tünelleme akımı gözlenmiştir. Şekil 2.13’de akım-voltaj türevi grafiğinde oklarla gösterilen tepeler kuantum kuyu temel enerji seviyesinden (+0,4 V civarında görülen düşüş) önce hizalanan safsızlık enerji seviyeleri üzerinden tünellemeyi göstermektedir. Şekil 2.12’de verilen görselde elektrik alan arttıkça önce safsızlık seviyeleri sonra kuantum kuyu temel seviyesi hizalanacaktır.



Şekil 2.13 Verici safsızlık seviyesinden tünellemeyi gösteren akım-voltaj (üst) ve türevi (alt) eğrileri

Kaynak: [40]

Şekil 2.14'te 0 T'dan 8 T'ya kadar farklı manyetik alanlar altında alınan akım – voltaj ölçümlerinin türevleri gösterilmektedir. Tünellemenin gözlemlendiği bölgede tepe/vadi oranının manyetik alanla değişimi sağ taraftaki grafikte verilmiştir.

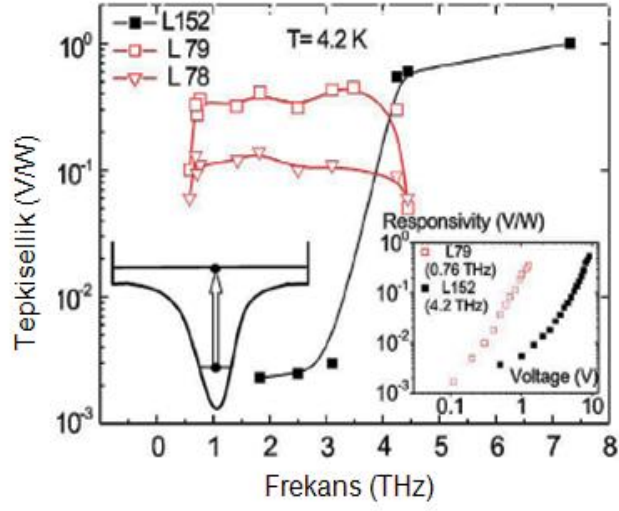


Şekil 2.14 Manyetik alanın tünellemeye etkisini gösteren akım-voltaj grafiği (sol) ve tünellemenin gözlemlendiği bölgedeki tepe noktasının vadinin dibindeki noktaya oranının manyetik alanla değişimi (sağ)

Kaynak: [40]

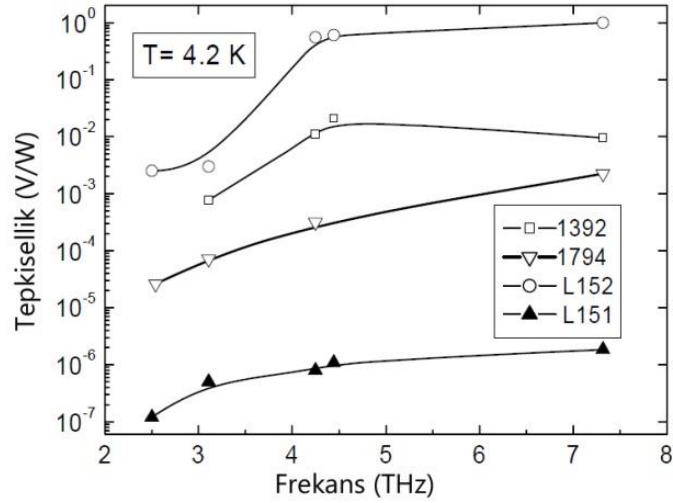
2.4. Kuantum Sınırlı Safsızlık Atomları Üzerinden THz Algılama

Sınırlandırılmış safsızlık atomları üzerinden THz algılama ile ilgili ilk çalışma Harrison ve ark. tarafından yapılmıştır [7]. Sonuçları Şekil 2.15'de verilen bu çalışmada, yanal aygıt tasarımına sahip kuyu merkezleri n- ve p-tipi katkı GaAs/AlAs çoklu kuantum kuyu yapıların fototepkisellik karakterizasyonları yapılmıştır. 4,2 K sıcaklıkta alınan ölçümlerde tepkisellik değerleri n-tipi katkı örneklerde 0,6-4,2 THz aralığında 0,3 V/W ve p-tipi katkı örneklerde ise 4,2-7,3 THz aralığında 1V/W elde edilmiştir. Ölçümlerde dikey gelen THz ışık olarak iki tür ışık kaynağı kullanılmıştır: serbest elektron lazeri ve optik pompa moleküler lazeri. Bu çalışmanın devamı niteliğindeki ikinci bir yayında [8] farklı düzeyde p-tipi δ -katkılı örnekler üzerinden Şekil 2.16'de gösterilen iyonlaşma enerjisinin altındaki sinyallerin (4 THz frekansının altındaki bölgenin) $2p^{3/2}$ ve $2p^{5/2}$ uyarılmış seviyelerine karşılık geldiği belirtilmiştir. Vurgulanan diğer bir noktaysa, katkılama konsantrasyonunun artmasıyla Mott geçişlerinden dolayı tepkisellik sinyalinin azaldığıdır [8]. Aynı grup, n-tipi GaAs/AlAs çoklu kuantum kuyu yapılarda Hall etkisi ölçümleri ve magnetodirenc verilerinin hızlı Fourier dönüşüm analizlerini yaparak MBE büyütme ve akım taşıma özelliklerini de ayrıntılı olarak incelemişlerdir [9].



Şekil 2.15 Biri p-tipi (L152) ve ikisi n-tipi (L78, L79) farklı konsantrasyonlarda δ -katkılı üç örnek için frekansa karşı tepkisellik ölçümü. Sol alt iç grafik safsızlık seviyeleri arası uyarılmaya bağlı geçişi temsil etmektedir. Sağ alt grafik ise L79 ve L152 örnekleri için uygulanan voltaja karşılık tepkiselliğin değişimini göstermektedir

Kaynak: [7]

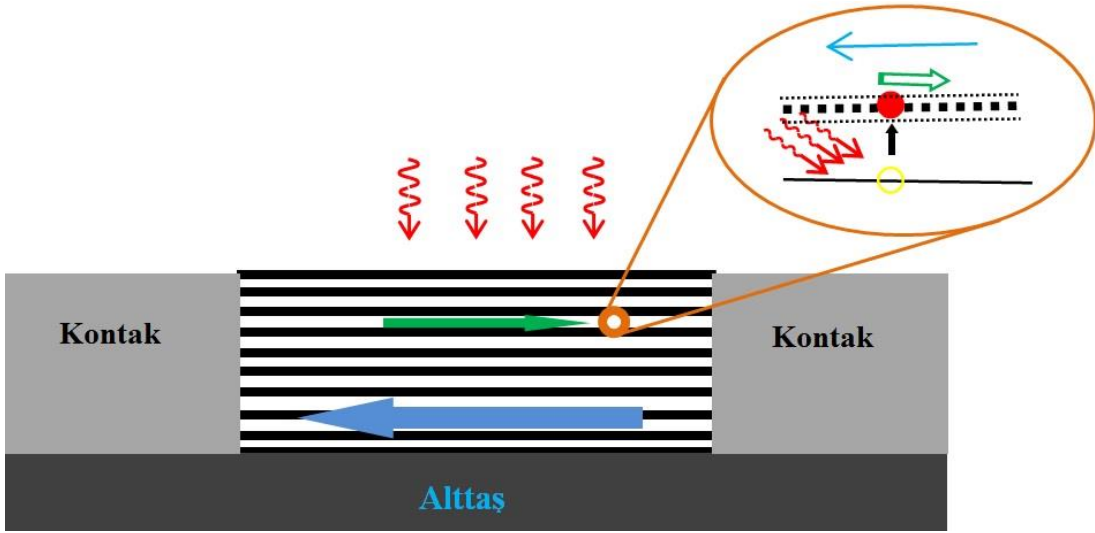


Şekil 2.16 Farklı kalınlık, tekrar sayısı ve δ -katkı konsantrasyonu için frekansa karşılık tepkisellik grafiği

Kaynak: [8]

Özet olarak, kuantum kuyu içindeki alıcı ve verici safsızlık atomlarının bağlanma enerjilerini değiştiren faktörler kullanılarak 1s-2p enerji farkı kabaca 1-100 meV

bölgesinde ayarlanabilir. Şekil 2.17'da kuantum kuyu içine yerleştirilen düşük konsantrasyonlu safsızlık atomlarının oluşturduğu, temel enerji seviyesinin hemen altında konumlanan, 1s-benzeri safsızlık atomları enerji seviyesi ve 2p-benzeri uyarılmış enerji bandı temsili olarak gösterilmektedir. Bu yapı üzerine THz ışık düşürüldüğünde 1s→2p enerji seviyeleri arası dipol izinli geçişler olacak ancak taşıyıcılar kuyu dışına çıkmaya yetecek enerjiye sahip olamayacaklardır. Bu tez çalışmasında, şematik yapısı Şekil 2.17'da verilen yanıl aygıt tasarımına sahip dedektör yapıları kullanılacaktır. Şekil 2.17'da çoklu kuantum kuyu tabakalara dik gelen THz frekanslı em dalgalar ile 1s seviyesinden 2p_± seviyesine uyarılan elektronların elektrik alan altında kontak bölgelere sürüklenmesi temsili olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.17 Yanıl aygıt tasarımıyla çalışan algılayıcı sistem. Kuantum kuyu katmanlar beyaz ve engel katmanları siyah çizgilerle gösterilmektedir. Örnek katmanlarına dik gelen THz em dalgalarıyla 1s seviyesinden 2p_± bant benzeri uyarılmış seviyesine çıkan elektronların uygulanan elektrik alan (mavi ok) altında kontak bölgesine sürüklenme (yeşil ok) mekanizmasının temsili gösterimi

3. DENEYSEL YÖNTEMLER

Bu bölümde tez kapsamında yapılan kristal büyütme, aygıt üretimi, yapısal ve optik karakterizasyonlarda kullanılan cihazlar ve deneysel yöntemler genel çerçevede kısaca tanıtılacaktır. Bölüm içindeki anlatım, aygıt üretim sürecinde takip edilen sıraya göre kullanılan cihazlar ve uygulanan deneysel yöntemler düşünülerek yapılmıştır.

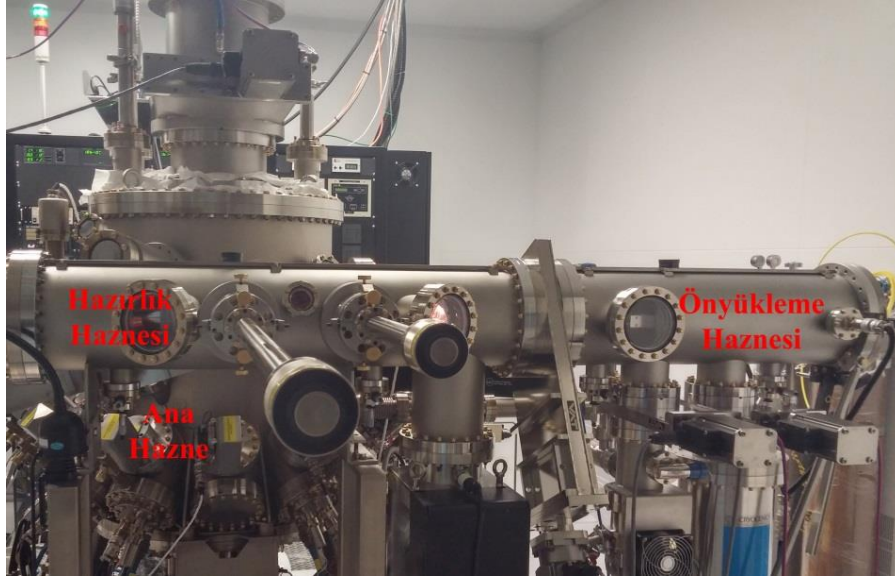
3.1. MBE sisteminde GaAs Büyütme ve Delta Katkılama

Atom katmanı mertebesinde büyütme hassasiyetine sahip olan moleküler demet epitaksi (MBE) sisteminde ultra yüksek vakum altında tek kristal yarıiletkenler büyütülebilmektedir. Delta katkılama gibi çok kritik işlemler ancak bu şartlar altında tam olarak başarılabilmektedir. Ancak bu düzeyde hassasiyet sağlayabilmek için çok karmaşık bileşenlerin bir arada ve kontrollü bir şekilde kullanılması gerekmektedir. Bu bölümde MBE sisteminin bu bileşenleri tanıtılacak ve tek kristal yarıiletkenlerin üretilmesi için yapılan ön hazırlık ve büyütme işlemleri genel olarak anlatılacaktır.

3.1.1. MBE sistemi ve GaAs tek kristal büyütme

Bu çalışmada epitaksiyel büyütme işlemleri Veeco Gen20MC moleküler demet epitaksi sistemiyle yapılmıştır. Sistem bakımının ardından 3-10 gün kadar 200 °C sıcaklıkta fırınlanan bu sistemin ana haznesinin taban basıncı $\sim 5 \times 10^{-11}$ Torr değerine ulaşırken hazırlık bölmesinin taban basıncı $\sim 3 \times 10^{-10}$ Torr ve önyükleme bölümünün taban basıncı $\sim 5 \times 10^{-8}$ Torr değerlerine ulaşabilmektedir. Bu ultra yüksek vakum (ultra düşük basınç) sisteminde örneklerin büyütme işlemine tabi tutulabilmeleri için iki aşamalı ön temizlikten (kusturma işlemleri) geçtikten sonra $\sim 3 \times 10^{-10}$ Torr basınç değerindeki ana hazneye aktarılabilir. Bu ilk iki aşama sırasıyla Loadlock olarak adlandırılan ön yükleme haznesi 10^{-8} Torr basınç seviyesine ulaşabilirken, Prep olarak adlandırılan hazırlık bölmesinin ulaşabildiği basınç değeri $\sim 3 \times 10^{-10}$ Torr mertebesinde. Şekil 3.1'de sistemin genel yapısı gösterilmektedir. Hazırlık haznesi, ana hazne ve önyükleme haznelerinden vakum sızdırmaz vanalar ile ayrılmaktadır. Önyükleme bölümünde alttaş taşıyıcı (wafer trolley) üzerine yerleştirilen alttaşlar fırılandıktan sonra hazırlık bölmesine geçirilmektedir. Hazırlık bölümünde temizlenen alttaşlar sırasıyla ana hazneye geçirilerek kristal büyütme işlemine geçilmektedir.

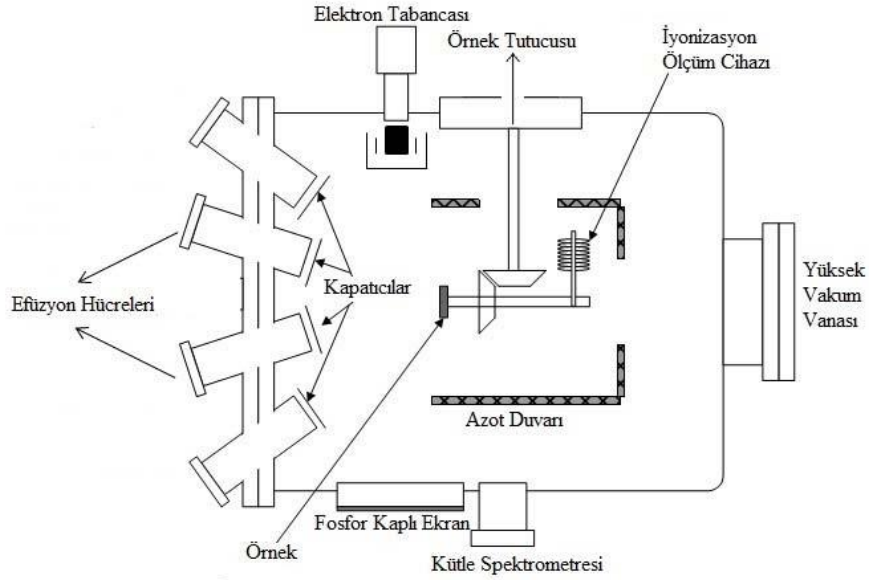
Sistem hakkında detaylı bilgi Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda daha önceden tamamlanmış tezlerde anlatılmıştır [58-59].



Şekil 3.1 *Bu tez kapsamında yarıiletken epitaksiyel kristal büyütmelerinde kullanılan Anadolu Üniversitesi Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda kurulu bulunan MBE sisteminin genel görünümü*

Bu tez kapsamında epitaksiyel olarak büyütülen bütün örneklerde, 3 inçlik yarı yalıtkan (SI), (100) yönelimli, yüzeyi büyütmeye hazır (epi-ready) GaAs alttaşlar kullanılmıştır. Paketlerinden çıkarılan alttaşlar özel tutuculara sabitlenerek önyükleme haznesindeki taşıyıcıya yerleştirilmektedir. Bu tutucular örneklerin hareketsiz kalmasını sağlarken örneklerin zarar görmeden transfer işlemlerinin yapılmasını sağlamakta ve yüksek sıcaklıklarda düşük buhar basıncına sahip molibdenden imal edilmişlerdir. Yükleme işleminden sonra önyükleme hazne kapısı kapatılarak vakuma alınmaktadır. Ancak, yükleme işlemi sırasında ne kadar hassas davranılırsa davranılsın, temiz oda ortamında bile olsa yine de alttaş ve alttaş tutucular buldukları ortamdan etkilenmektedirler. Atmosfere maruz kalan örnekler üzerinde özellikle su buharı ve diğer olası kirlilikler kontaminasyona neden olmaktadır. Bu nedenle MBE sisteminin bilgisayar üzerinden yönetimini sağlayan Molly yazılımı yardımıyla önyükleme haznesi kontrollü olarak 150 °C sıcaklığa ısıtılarak havadan gelen su buharı ve organik kirlilikler başta olmak üzere moleküler kontaminasyonlardan arındırılması (degasing)

işleminin ilk basamağı tamamlanmaktadır. Yazılım sürekli olarak sistemin basınç değerinin kritik seviyenin üstüne çıkmasını engelleyecek şekilde kontrollü olarak çalışmaktadır ve bu nedenle buradaki işlem kirlilik durumuna bağlı olarak bir gün kadar sürebilmektedir. 150 °C'ye ulaşıktan sonra bir saat süreyle bu sıcaklıkta fırınlanan bölme, oda sıcaklığına soğutulduktan ve bu haznesinin basıncı 10⁻⁸ Torr mertebesine ulaşıktan sonra alttaşlar hazırlık haznesine aktarılmaktadır. Hazırlık haznesinde her bir alttaş tek tek kuvars lamba ısıtıcısının önüne yerleştirilmekte ve otomasyon yardımıyla kontrollü olarak 350 °C sıcaklığa ısıtılarak (degasing) mümkün olduğunca kontaminasyonlardan arındırılmaktadır ve sistem vakum seviyesi iyileşince soğutulmaktadır. Böylece üzerlerine kristal büyütmesi yapılacak alttaşlar ana hazneye girebilecek ölçüde temizlenmiş olmaktadır.



Şekil 3.2 Katı kaynaklı bir MBE sistemini genel görünüşü

Kaynak: [59-60]

Alttaşların kristal büyütme için standart temizlikleri yapıldıktan sonra büyütme işlemine başlamak için ana haznede bekleme modunda bulunan malzemelerin hazırlanması gerekmektedir. Şekil 3.2'de genel olarak bir MBE sisteminin

kaynaklarının ve diğer bileşenlerin konumunu şematik olarak gösterilmektedir. Bu tez kapsamında kullanılan Ga, Al, As, Be ve Si kaynak malzemeleri, büyütme işlemi yapılmadığı zaman dilimlerinde mümkün olduğunca en az buharlaşacakları sıcaklıklarda bekletilmektedirler. Bu, hem malzeme kaybını en aza düşürmekte hem de sistem vakumunun en yüksek değerinde kalmasını sağlamaktadır. Epitaksiyel büyütme işlemine geçmeden önce malzemelerin uygun buhar basıncı elde edileceği sıcaklıklara çıkarılıp bu sıcaklıklarda kararlı hale gelinceye kadar bekletilmesi gerekmektedir. Malzemelerin kararlı hale gelmesinin ardından iyon ölçer (BFM, Beam Flux Monitor) yardımıyla Ga, Al ve As malzemenin o sıcaklıklardaki akıları sistemdeki basınç (vakum) seviyesi cinsinden ölçülmekte ve sistemin arkaplan (background, base) basıncı bu değerlerden çıkarılarak eşdeğer basınç değeri (BEP, Beam Equivalent Pressure) elde edilmektedir. Bu değerler epitaksiyel büyütme hızı, alaşım oranı ve V/III oranı gibi kritik değerlerin sabit tutulması açısından sürekli kontrol edilmesi ve hücre sıcaklıklarıyla ayarlanmaları gereken değerlerdir. Burada Ga ve Al malzemelerinin sıcaklıkları arttırılıp azaltılarak istenen akı değerlerine ulaşılırken As için akı mertebesi yeterli olduğu müddetçe sadece vana açıklığı ile kontrol edilmektedir. Her bir malzeme sistemi için, gönderilen III-grubu malzeme başına As miktarını gösteren V/III (BEPV/BEPIII) oranı farklıdır ve büyütme yapılacak sıcaklığa bağlı olarak özel ayarlanması gerekmektedir.

Akı ölçümlerinin tamamlanması ve sistem basınç değerinin istenen düzeye düşmesinin ardından büyütme işleminde kullanılacak olan alttaşın ana hazne içine yerleştirilmesi manyetik olarak hareket ettirilen kol yardımıyla yapılmaktadır. Alttaşın 1000°C sıcaklığa kadar ısıtılabilmesi ve aynı zamanda 0 - 120 tur/dak. hızla döndürülebilmesini sağlayan robotik kola sabitlenen alttaş, kristal büyütmesi için efüzyon hücrelerine bakacak şekilde aşağı doğru döndürülür.

Alttaşlar, arkasındaki ısıtıcı yardımıyla belli bir hızla ısıtılır. Sıcaklık ısıtıcının içindeki ısılcıfta ve kamerası alttaşı tam karşıdan göreceği şekilde konumlanmış pirometre ile ölçülmektedir. Sistemde kullanılan pirometre, alttaş sıcaklığı ≥ 400 °C bölgesindeyken kararlı bir şekilde okuma yapmaktadır. Isıtılan alttaş, bütün yüzeyinin eşit ısınması için uygun bir hızla kendi ekseninde döndürülmeye başlanır. Alttaş ısınırken V-grubu malzemeler artan sıcaklıkla birlikte yüzeyden buharlaşmaya başlamaktadır. Kaçan V-grubu atomlarının yerlerini tekrar doldurmak ve alttaş

yüzeyindeki kristal yapının bozulmasını önlemek amacıyla V-grubu malzeme (As) akısı verilmektedir. Kristal büyütme işlemine geçmeden önce GaAs alttaşın yüzeyinde bulunan doğal oksit tabakasının kaldırılarak kristal yüzeyinin ortaya çıkarılması gerekmektedir. GaAs alttaşlar için sıcaklık 605 ± 5 °C değerine ulaştığında Ga ve As oksitler yüzeyden temizlenmeye (oxide desorption) başlamaktadır [61]. Bu sıcaklık değerleri malzemeler için karakteristik değerlerdir. Oksit tabakanın kalkması RHEED (Reflection High-Energy Electron Diffraction, yansımali yüksek enerji elektron kırınım) tekniği ile belirlenmektedir. RHEED tekniğinde bir elektron tabancasından çıkan elektron demeti alttaş yüzeyine $1-3^\circ$ gibi küçük açılarla çarpmakta ve kristal düzlemlerinden kırınımına uğrayarak karşı taraftaki fosfor ekrana çarparak kristal yapının karakteristik desenini görünür hale getirmektedir. Bu teknik kristal büyütme modlarının tespiti için vazgeçilmez bir bileşendir. RHEED desenlerinden oksidin kalkmaya başladığı andan itibaren belirli bir süre (bu çalışmada kullanılan alttaşlar için ~8 dk.) beklenerek GaAs için ~590 °C olan ideal büyütme sıcaklığına inilir.

Kristal yüzeyinde meydana gelen bozulmaları gidermek amacıyla ~300 nm GaAs tampon tabaka büyütülür. İyi yüzey morfolojisine sahip GaAs kristal büyütme için V/III oranı ~15 tutularak RHEED (2x4)(001) As-kararlı yeniden yapılanma (reconstruction) deseniyle büyütüldü [61-63]. Kristal büyütme işleminde bir tek atom katmanın oluşması için gereken sürede (büyüme hızından elde edilmiştir) alttaş bir tur yapacak şekilde dönme hızı ayarlanır. Bahsi geçen bütün aşamalar, sistemi bir bütün olarak kontrol edebilen otomasyon programı üzerinde oluşturulan reçeteler yardımıyla yapılabilmektedir. Bu reçeteler üzerinde yapılan kodlamalar yardımıyla milisaniye mertebesindeki işlemler yapılabilmekte, aynı zamanda büyütme işlemi sırasında sıcaklık sabit tutulabilmektedir. Bu tez kapsamında yapılan ilk çalışmalarda büyütme koşulları ayrıntılı şekilde irdelenmiş ve genel büyütme parametreleri belirlenerek bütün kristal yapılar reçeteler yardımıyla büyütülmüştür. Tampon tabakanın büyütülmesinin de dâhil olduğu bu aşamalar bütün büyütme için aynıdır. Tampon tabakanın üzerine büyütülen yapılar için kullanılan parametreler III-V malzemelerinin ve üretilmek istenen aygıtların özelliklerine bağlı olarak değişebilmektedir. Kullanılan parametrelerin ayrıntıları 4. ve 5. bölümlerde verilmiştir.

Tasarlanan yapının büyütme işlemi tamamlandıktan sonra örnek üzerindeki III grubu akısı kesilerek sadece V grubu malzeme akısı altında alttaş belli bir hızla

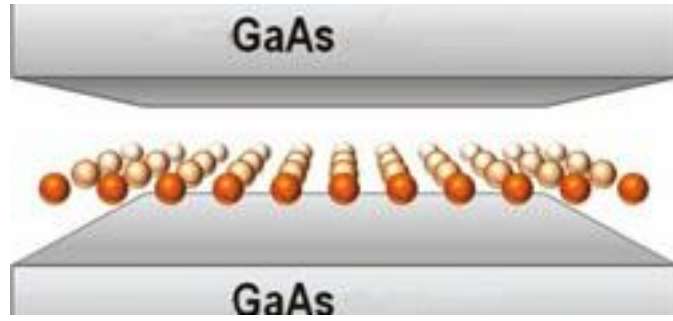
soğutulur. V grubu akısı ise alttaşın yüzeyinde yoğuşmaya başlayacağı sıcaklıklara inmeden kesilir ve alttaş hızlıca soğutulur. Robotik kol çıkarma pozisyonuna alınır ve hazırlık bölümüne alınır. Hazırlık bölümündeki örnekler sistemden çıkarılacağı zaman önyükleme bölümüne geçirilerek sistemden dışarı çıkarılır. Bu noktadan sonra örnek üzerinde hasarsız ölçüm yöntemleri öncelikli olacak şekilde büyütülen yapının yapısal karakterizasyonları yapılır.

3.1.2. Delta (δ) katkılama

Bu tez çalışmasının en önemli basamağı kuantum kuyuların içine safsızlık atomlarının iki boyutlu (sheet, planar veya delta (δ) doping) olarak istenen miktarda katkılanmasıdır. Daha önceden de bahsedildiği gibi safsızlık atomlarının kuantum kuyu içinde Hidrojenik enerji seviyelerinin bant yapısı oluşturacak şekilde etkileşmeden kalabilmesi için aralarındaki mesafe Bohr yarıçapı mertebesinde kalmalıdır. Ancak optoelektronik karakterizasyonlarda varlıklarının ve etkilerinin tespit edilebilmesi için konsantrasyonlarının belli bir mertebenin üzerinde olması gerekmektedir. Ayrıca safsızlık atomlarının kuantum kuyu içindeki konumlarına bağlı olarak $1s$ ve $2p_{\pm}$ bağlanma enerjileri değişeceğinden kuyu içinde farklı bağlanma enerjisine sahip safsızlık atomları olacaktır ki bu da amaçlanan hedef doğrultusunda istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle, safsızlık atomlarının mümkün olduğunca büyütme düzlemine paralel olacak şekilde tek atom katmanı olarak kuantum kuyunun içine yerleştirilmesi gereklidir. Moleküler demet epitaksi sistemi bu işlemin hassas bir şekilde yapılabilmesine olanak tanımaktadır: milisaniye sürede tepki verebilen kepenk sistemi, anında akıyı kesip büyütmeyi durdurabilmekte veya devam ettirebilmektedir. Delta katkılama işlemi için kuantum kuyunun (GaAs tabaka) istenen bölgesine gelindiğinde Ga akısı kesilerek kristal büyütme durdurulmaktadır. Yüzeyden kaçan V grubu atomlarını baskılayıp yüzeyin bozulmasını engellemek ve özellikle Si'nin amfoterik özelliğini baskılamak amacıyla As akısı kesilmemektedir. As akısı altında safsızlık atomları olarak kullanılacak katkı malzemesinin kepenği açılıp kapatılarak III grubu atomlarının (Ga) yerine bir katman Si (n-tipi) veya Be (p-tipi) efüzyon hücresinin kepenği açılıp saniye mertebesinde (Denklem 3.1'de verilen denklem yardımıyla belirlenmektedir) beklendikten sonra kapatılarak istenen düzeyde safsızlık yoğunluğu elde edilmektedir. Ardından Ga akısı tekrar verilerek büyütme işlemine devam edilir.

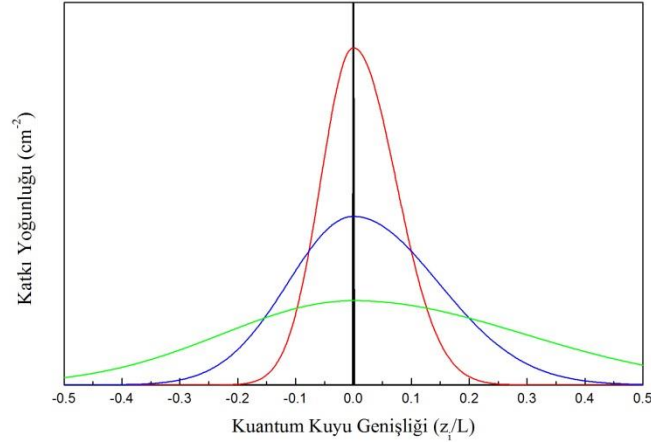
GaAs katmanının arasına sıkıştırılan tek katman katkı atomlarının durumu temsili olarak Şekil 3.3'te gösterilmiştir.

Büyütme işleminin yüksek sıcaklıklarda yapılıyor olmasından dolayı safsızlık atomları buldukları katmandan GaAs içine doğru difüzyona uğrarlar [46]. Bu durum özellikle büyümenin devam ettiği yüzeye doğru daha yoğun olmaktadır [45].



Şekil 3.3 GaAs kuantum kuyu tabakanın içine tek atomik katman olarak yerleştirilen safsızlık atomlarının temsili gösterimi

Safsızlık atomlarının yerleştirildikleri konumda kalmaları veya difüzyona uğramaları durumunda kuantum kuyu konumuna bağlı olarak katkı konsantrasyonunun değişimi Şekil 3.4'te verilmiştir: yatay eksen büyütme doğrultusunu göstermekte olup merkezdeki siyah çizgi bu doğrultuya dik tek atom katmanını temsil etmektedir. Sırasıyla kırmızı, mavi ve yeşil renkli eğriler safsızlık atomlarının difüzyon şiddetinin artışı yani delta fonksiyonundan uzaklaşmayı temsil etmektedirler.



Şekil 3.4 *GaAs kuantum kuyu tabakanın içine tek atomik katman olarak yerleştirilen safsızlık atomlarının büyütme doğrultusunda difüzyona uğrayarak kuantum kuyu içinde delta fonksiyonu benzeri konsantrasyon dağılımı (L kuantum kuyu genişliği ve z_i kuantum kuyu içindeki konum). Bu grafikte sırasıyla siyah, kırmızı, mavi ve yeşil renkler artan yönde difüzyon büyüklüğünü temsil etmektedir.*

Bu temsili gösterimlerdeki yeşil eğri safsızlık atomlarının difüzyonla bütün kuyuya dağıldığı durumu göstermektedir. Büyüme negatif eksen de başlayıp pozitif eksene doğru devam etmekte olduğundan pozitif bölgede difüzyon daha fazladır [45]. Bu durumu engellemek amacıyla genellikle düşük sıcaklıklarda büyütme yapılmaktadır [45-46]. Düşük sıcaklık büyütmelerinde, difüzyon etkin bir şekilde azalmakta ancak kristal kusur yoğunluğu belirgin bir şekilde artmaktadır, dolayısıyla kristal kalitesinden taviz verilmektedir [47]. Bu nedenle, optimize bir büyütme sıcaklığı kullanmak gerekmektedir.

Delta katkılama süresini belirlemek için aşağıdaki deneysel formül kullanılmaktadır.

$$N^{2D} = N^{3D} \times v_g \times t \quad (3.1)$$

Burada N^{2D} (taşıyıcı sayısı / cm^2), v_g (cm/s) ile verilen büyütme hızı için belirlenen üç boyutlu (külçe) katkı konsantrasyonunu N^{3D} (taşıyıcı sayısı / cm^3) ve delta katkılama için kullanılan süre t (s) yardımıyla elde edilen iki boyutlu katkı yoğunluğudur [44]. Kuantum kuyu içindeki iki boyutlu katkı yoğunluğunun üç boyutlu eşdeğer katkı konsantrasyonu Denklem 3.2'de verilmiştir. Örneğin $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$

değerindeki iki boyutlu katkılama, yarıiletken içinde üç boyutta $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ katkı yoğunluğuna karşılık gelecektir.

$$N^{3D} = (N^{2D})^{3/2} \quad (3.2)$$

3.2. Yapısal Karakterizasyonlar

MBE sisteminde büyütülen tek kristal katmanların X-ışını kırınımı (X-ray diffraction, XRD) yöntemi ile kristal kalitesi ve alaşım oranları, X-ışını yansıma (XRR) yöntemi ile katman kalınlıkları ve arayüz pürüzlülük düzeyi belirlenebilmektedir. Spektroskopik elipsometre (SE) yöntemi ile görece olarak basit epikatman yapıların kalınlık, alaşım oranı ve yüzey pürüzlülüğü daha hızlı belirlenebilmektedir. MBE sisteminde büyütülen örneklere zarar vermeden yapısal karakterizasyonlarının yapılabildiği bu sistemler genel olarak burada anlatılacaktır.

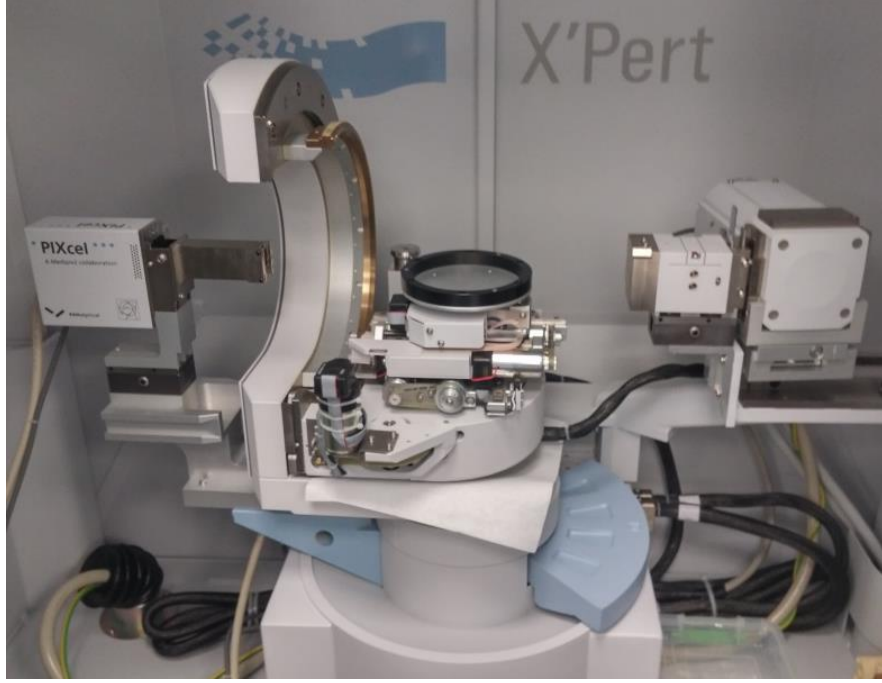
3.2.1. X-ışını kırınım (XRD) ve X-ışını yansıma (XRR) yöntemleri

X-ışını kırınımı (X-ray diffraction, XRD) yöntemi, malzemelerin kristalografik yapısı hakkında net bilgiler elde edilebilen hasarsız bir yöntem olması nedeniyle yarıiletken kristal teknolojisi açısından vazgeçilmez bir yapısal karakterizasyon yöntemidir. Bir küre yüzeyinde (sanal) bulunan x-ışını üretici ve x-ışını dedektöründen oluşan sistemin merkezinde incelenecek numune bulunur. Yüksek çözünürlük elde etmek için x-ışını tüpünden çıkan demet, ayna ve monokrometre düzenekleri yardımıyla birbirlerine paralel ve tek dalga boyundan oluşacak şekilde düzenlenir. Kristal düzlemlerindeki atomların elektronlarıyla etkileşen x-ışınlarından kırınıma uğrayanlar sadece belli açılarda yapıcı girişime uğrarlar ve dedektörle algılanabilirler. Yapıcı girişimin, x-ışınının dalga boyuna, incelenecek kristalin örgü sabitine ve ölçüm yapılacak düzlemin Miller indislerine bağlı olarak hangi geliş açılarında meydana geleceği Bragg yasasıyla belirlenir. Denklem 3.3'te verilen Bragg yasasında d ile verilen, Şekil 3.6'da gösterilen ölçüm yapılacak kristal düzlemleri arasındaki mesafedir. Bu parametrenin elde edilişi yüzey merkezli kübik kristaller için Denklem 3.4'te verilmiştir. h , k ve l Miller indislerine örgü sabiti a 'ya bağlı olarak elde edilir. Bu açılar

malzemeler için ayırt edici bir özelliktir ve kristal yapısındaki atomların örgü sabitlerine bağlıdır.

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (3.3)$$

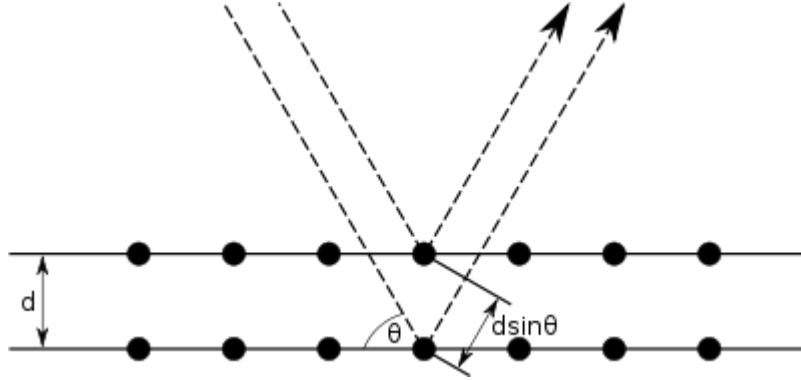
$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \quad (3.4)$$



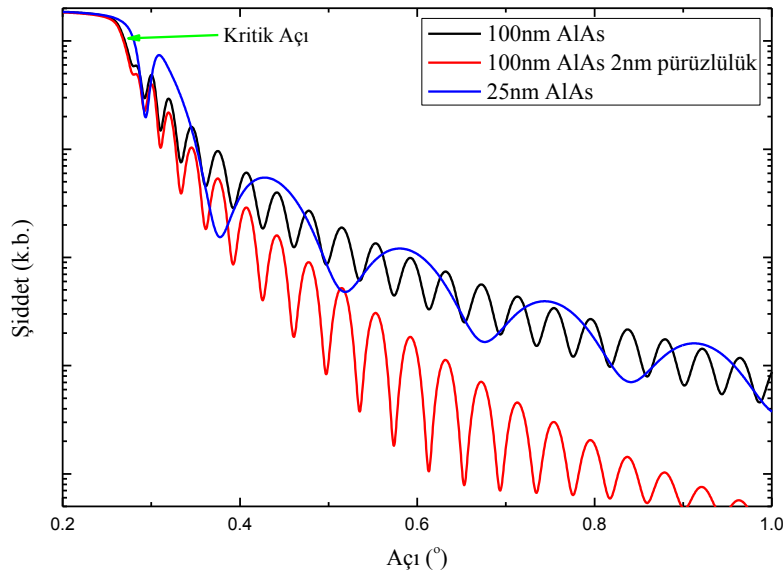
Şekil 3.5 Bu tez kapsamında büyütülen yarıiletken kristal tabakaların yapısal karakterizasyonlarında kullanılan Anadolu Üniversitesi Nanoboyut Araştırma Laboratuvarında kurulu bulunan Panalytical X'Pert Pro MRD yüksek çözünürlüklü x-ışını kırınım cihazı

Malzemenin kristal yapısı ve düzlemlerine bağlı olarak ölçülen ışığın şiddeti, kırınımına uğrayan kristal düzlemlerindeki elektron yoğunluğuna bağlı olarak değişkenlik gösterir. Örneğin bu çalışma kapsamında kullanılan yüzey merkezli kübik yapıya sahip GaAs alttaşlar için en yüksek ışık şiddeti (0 0 4) düzleminde alınan ölçümlerde elde edilir. Ölçümlerde yüksek çözünürlük elde etmek için kullanılan ayna ve monokrometre x-ışınlarının şiddetini çok azaltmaktadır. Bu nedenle tez çalışmasında alttaş ve epikatmanların kristal kalitesin belirlenmesinde x-ışını kırınım ölçümleri (0 0 4) düzleminde alınmıştır. Cu $K\alpha_1$ x-ışını ($\lambda \approx 0,15406$ nm) kullanılarak yüksek

çözünürlükle GaAs için (0 0 4) düzleminde elde edilen tepe (peak) dört yansımali Ge (2 2 0) monokrometreyle bütünleşik hale getirilmiş ayna sisteminden oluşan hibrit monokrometreyle sallantı eğrisi (Rocking Curve, RC) 0,0005° çözünürlükte detaylı olarak incelenmiştir.



Şekil 3.6 Kristal düzlemine θ açısıyla gelen x-ışınlarının farklı atomik katmanlardan saçılırken aralarında oluşan faz farkının şematik gösterimi



Şekil 3.7 GaAs (100) alttaş üzerine büyütülen farklı özellikteki AlAs epikatmanlar için yapılan benzetim sonuçları

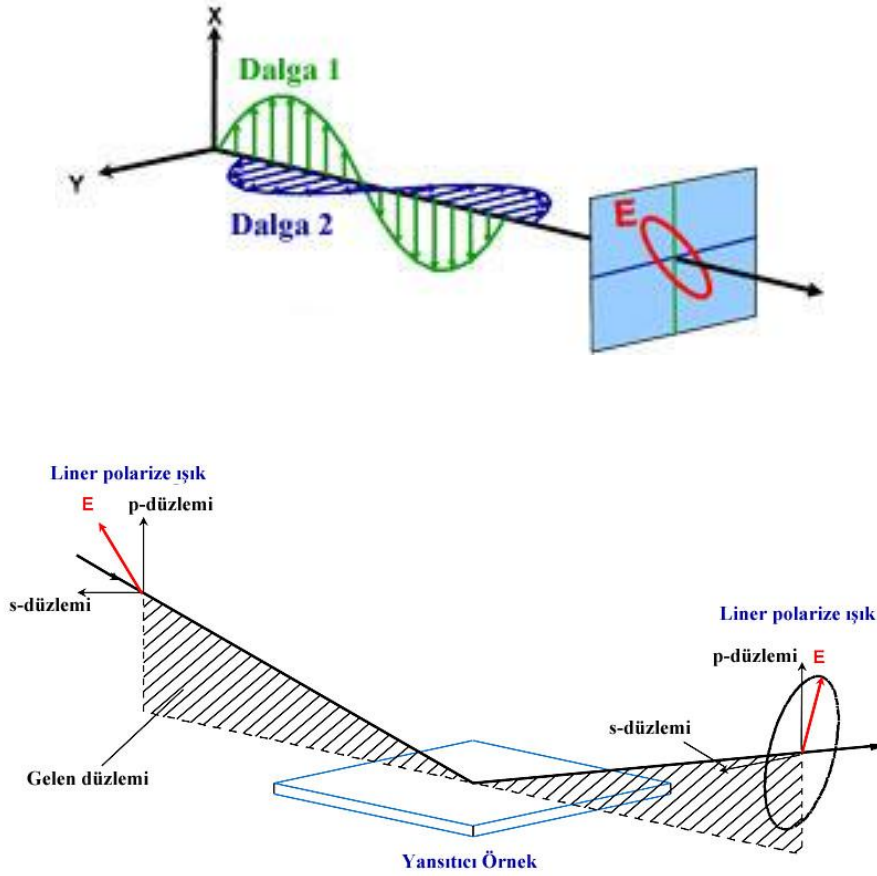
X-ışını yansımaya (x-ray reflectivity, XRR) yöntemi kabaca 1 μ m'nin altındaki kalınlıklara sahip epikatmanların kalınlık ve pürüzlülük değerlerinin ölçüm sonuçlarının benzetimi yapılarak belirlenebildiği bir x-ışını yöntemidir. XRR yönteminde çok küçük açılarla yüzeye gönderilen x-ışınları epikatmanların arayüzlerinden yansımaya uğrayarak açı ve kalınlığa bağlı olarak yapıcı ve yıkıcı girişimleri yapar. Elde edilen desenlere arasındaki açılar katman kalınlıklarını verirken şiddetteki düşüş hızı pürüzlülük hakkında bilgi verir. Şekil 3.7'de GaAs üzerindeki farklı özelliklerdeki AlAs katmanı için X'Pert Reflectivity programıyla yapılan benzetim işlemi sonucu elde edilen Kiessig saçaklarının (fringes) değişimi sunulmuştur. AlAs tabaka kalınlığı 100 nm'den 25 nm'ye düşürülünce saçak genişliği ($^{\circ}$) ters orantılı olarak dört katına çıkmaktadır. Bu tabakada 2 nm kadar pürüzlülük olması durumunda ise açığa bağlı olarak x-ışını şiddeti hızla düşmekte yani eğim artmaktadır. Ayrıca x-ışını şiddetinin $I_{tepe} / 2$ değerine düştüğü nokta ise malzemenin yoğunluğuna (g/cm^3) bağlı bir parametre olan kritik açı (critical angle) olarak tanımlanmaktadır ve Şekil 3.7'de 100 nm kalınlıkta AlAs için yeşil okla gösterilmiştir. Malzemeye has bir parametre olan bu değer yardımıyla X'Pert Reflectivity programında kalınlık bilgisi elde edilmektedir.

3.2.2. Spektroskopik elipsometre

Elipsometre, özellikleri bilinen lineer polarize bir elektromanyetik dalganın örnek yüzeyinden yansımaya uğradıktan sonra polarizasyon durumlarındaki değişimini ölçen optik bir sistemdir. Şekil 3.8'de üstte eliptik polarize ışık temsili olarak gösterilirken altta, örnek üzerinden yansımaya uğrayan lineer polarize ışığın polarizasyon değişimi gösterilmektedir. Elipsometre, örnekten yansıyan ışığın s ve p polarize durumdaki fotonlarının genliklerinin oranı Ψ ve fazlarının farkı Δ gibi iki fiziksel olmayan niceliğin değişimini ölçer. Ölçülen bu nicelikler, yansıtıcı tabakanın kalınlık ve optik özelliklerine bağlıdır. Benzetim programları yardımıyla bu parametreler ve ışığın geliş açısı değiştirilerek Ψ ve Δ sonuçları yeniden elde edilir. Benzetim sonuçlarıyla ölçüm sonuçları arasındaki fark ise ortalama karesel hata (MSE, mean square error) ile verilir. Bu fark ne kadar küçükse benzetim işlemi o kadar başarılıdır.

Bu tez çalışmasında J.A. Woollam firmasının M2000F spektroskopik elipsometre (SE) sistemi kullanılmıştır. Bu sistem 75° sabit açıda 245 – 1000 nm dalgaboyu aralığını hızlı bir CCD (charge coupled device) dedektörle ölçmektedir. WVASE32 ölçüm ve

modelleme programı yardımıyla analizler yapılmıştır. SE ölçüm sistemi özellikle $Al_xGa_{1-x}As$ epikatmanların kalınlık ve alaşım oranlarının hızlıca belirlenmesinde aktif olarak kullanılmıştır. Bu yöntemde çok çabuk sonuç alınabildiği için aynı zamanda çoklu kuantum kuyuların ortalama katman kalınlıkları ve ortalama alaşım oranlarının değerlerini belirlemek için de kullanılmıştır.



Şekil 3.8 Eliptik polarize elektromanyetik dalganın temsili gösterimi (üst) ve elipsometre ölçüm sisteminin çalışma prensibini temsili olarak gösterimi (alt)

3.3. Aygıt Üretimi

Tez kapsamında MBE cihazı kullanılarak büyütülen yapıların elektriksel ve optoelektronik karakterizasyonlarının yapılabilmesi için elektrik bağlantılarının yapılabilirdiği aygıtlar haline getirilmeleri gerekmektedir. MQW THz algılayıcılar için yanal aygıt tasarımı ve DBRT yapılar için dik aygıt tasarımı iki tip aygıt üretimi 1 x 1

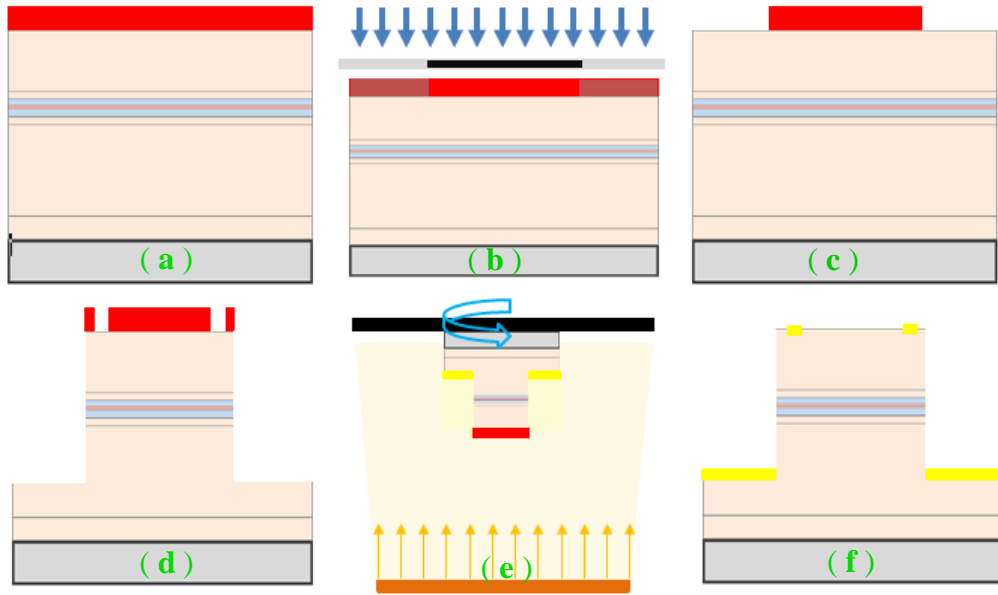
cm² büyüklüğündeki numuneler kullanılarak 100 sınıfı temiz odada yapılmıştır. Bu iki aygıt tasarımı için hemen hemen bütün fabrikasyon basamakları aynı olmakla birlikte sadece pozlama için kullanılan maskeler farklıdır.

Öncelikle MBE'de 3" GaAs üzerine büyütülmüş yapılardan 1 x 1 cm² büyüklüğünde parça kesilir ve yüzeyindeki toz ve organik kirliliklerden arındırmak amacıyla aseton ile ve aseton kalıntılarını temizlemek için de izopropanol alkolle temizlenir. Atmosfer koşullarında AlGaAs'a göre daha az oksitlenme eğiliminde olduğu için büyütme işleminde en son GaAs şapka katmanıyla bitirilmiş olan yüzeyde yaklaşık olarak 2 nm GaAs-oksit (özellikle Ga₂O₅ ve As₂O₅) vardır. Bu oksit tabakaları yalıtkan olduklarından optoelektronik aygıtların üretimlerinde sıkıntı oluşturmaktadır. Bu nedenle 1:1 oranlı HCl:H₂O çözeltisinde 30s kadar bekletilerek bu tabaka aşındırılır ve sonrasında deiyonize su ile durulanıp basınçlı saf azot gazı yardımıyla kurutulur.

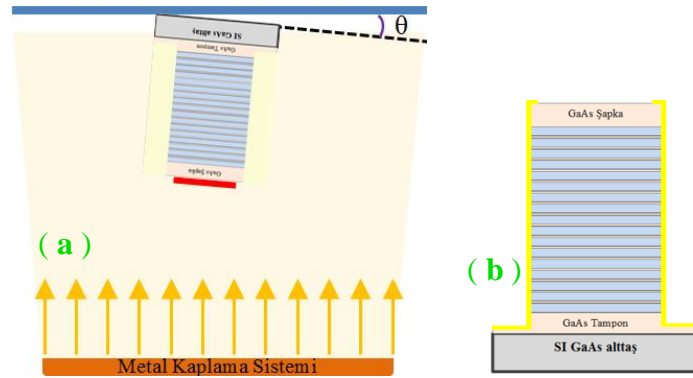
Numune üzerine morötesi (ultraviolet, UV) ışığa duyarlı ancak asitlere dayanıklı organik bir malzeme olan fotorezist (AZ5214E) kaplanır. Fotorezistin yüzeye düzgün kaplanması için numune döner kaplayıcı (spin coater) yardımıyla yüksek devirlerde (500rpm 45s) döndürülür. Fotorezistin kuruması için 100°C sıcaklıkta 1 dk bekletilir (soft bake). Şekil 3.9 a'da bu yöntemle hazırlanmış bir numunenin temsili gösterimi verilmiştir. Numune maske hizalayıcı (mask aligner, MIDAS MDA-400M-6) cihaza istenen maske ile birlikte yerleştirilir ve hizalanır. Ardından Şekil 3.9 b'de temsili olarak gösterilen ışınlama diye tanımlanan UV ışığa maruz bırakma işlemi uygulanır. Burada UV ışığı gören fotorezistin bağları zayıflarken maske yardımıyla UV ışığa maruz kalması engellenen bölgelerdeki fotorezist hiçbir değişim göstermez. Tab çözeltisine (1:1 AZ400K:H₂O) daldırılan numune yüzeyinde UV ışığa maruz kalan bölgelerdeki fotorezist tamamen yüzeyden temizlenir. Şekil 3.9 c'de tab edilen numunenin şematik gösterimi verilmiştir. Yüzey profilometre cihazı (KLA Tencor P-6) yardımıyla fotorezist kalınlığı ölçülür. Bu aşamadan sonra sert ısıtma olarak tanımlanan ve fotorezistin asitlere karşı dayanıklılığını arttırmak amacıyla 120°C sıcaklıkta 5 dk bekletilir (hard bake).

Numune artık üzerinde masatepe yapıların (mesa structure) oluşturulması aşamasına hazırdır. Yüzey üzerinde fotorezist bulunmayan bölümler ıslak aşındırma için kullanılacak çözeltiyle tepkimeye girerek yüzeyden ayrılır. Masatepe yapılar

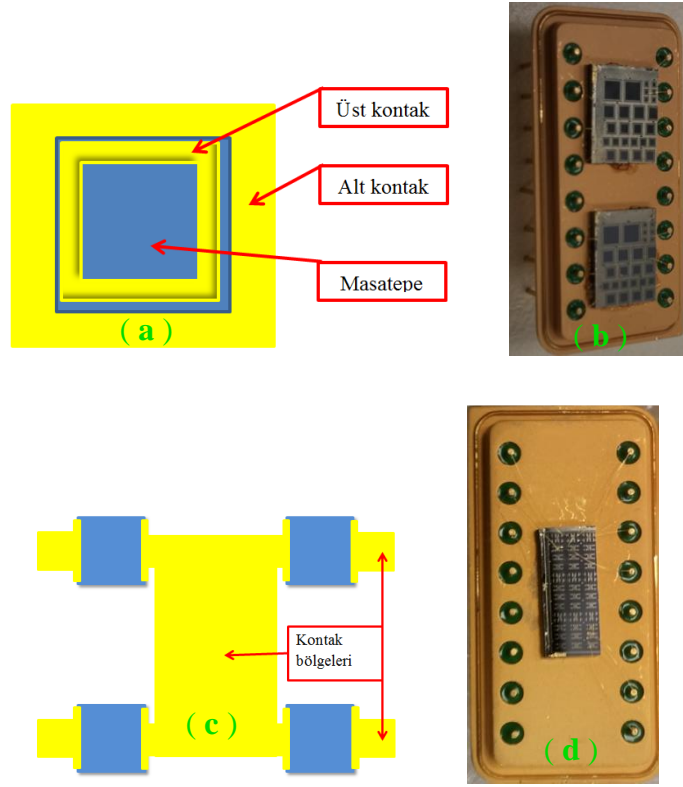
$H_2SO_4:H_2O_2:H_2O$ (1:8:160) asit çözeltisi yardımıyla istenen derinliğe ulaşıncaya kadar ıslak aşındırma yapılır, deiyonize su ile durulanır, azot gazıyla kurutulur ve ardından profilometre cihazında aşındırılan derinlik ölçülür. İstenen masatepe yapı elde edildikten sonra aseton içinde yüzeydeki koruyucu fotorezist kaldırılır. Şekil 3.9 d’de istenen masatepe yapısı elde edilmiş ve metal kaplanacak bölgelerin belirlenmesi için fotorezist kaplanıp tab edilmiş örneğin temsili gösterimi verilmiştir. Bu görsellerde kırmızı renkli bölgeler fotorezist malzemesini ve sarı renkli bölgeler kaplanan metalleri temsil etmektedir. DBRT yapılar için bu aşamadan sonra üst ve alt kontakların oluşturulması için e-demet metal kaplama (Vaksis Midas PVD/eB) sisteminin içine yerleştirilerek (Şekil 3.9 e) n-tipi numuneler sırasıyla Nikel/Germanyum/Altın metalleri 25/55/170 nm kalınlıklarda kaplanmıştır. P-tipi DBRT numuneler için sırasıyla Krom/Altın metalleri 30/250 nm kalınlıklarda kaplanmıştır. Ancak yanal aygıt tasarımına sahip çoklu kuantum kuyu dedektör yapıların Şekil 3.10 b’de şematik olarak gösterildiği gibi kontak bölgelerinin doğrudan kuantum kuyulara temas etmesi gerekmektedir. Bu nedenle masatepe yapıların yan yüzlerinin metalle kaplanabilmesi için kaplama işleminin Şekil 3.10 a’da şematik olarak gösterildiği gibi numunelerin $\theta=\pm 5^\circ$ olacak şekilde konumlandırıldılar. Her bir metalin kaplanması için yarı kalınlığa kadar $\theta=-5^\circ$ kalan yarı kalınlık ise $\theta=+5^\circ$ konumunda tutulmuştur.



Şekil 3.9 Çift engel tünelleme (DBRT) örneklerinin fotolitografi süreçlerinin temsili gösterimi. a) numunenin üzerine fotorezist serilmesi, b) maskenin metal kaplı olmayan bölümlerinden geçen UV ışığın fotorezistin yapısını bozması, c) tab edilen numune, d) aşındırılan numunenin metal maskesi yardımıyla fotorezist ile maskelenmesi, e) metal kaplama sisteminde metal kaplama işleminin şematik gösterimi ve f) fotolitografi ve metal kaplama işlemleri tamamlanmış olan aygıt.



Şekil 3.10 Yanal aygıt tasarımına THz ışık algılayıcıların yan yüzeylerinin etkin bir şekilde metal kaplanması için uygulanan açılı kaplama işleminin şematik gösterimi ve metal kaplanan yanal aygıt tasarımıyla üretilen THz algılayıcının temsili gösterimi



Şekil 3.11 DBRT numunelerin için; şematik masatepe (a) yapısı ve paketlenme ve tel bağlama işlemi tamamlanmış aygıtların resmi (b), MQW numunelerin; şematik masatepe (c) yapısı ve paketlenme ve tel bağlama işlemi tamamlanmış aygıtların resmi (d)

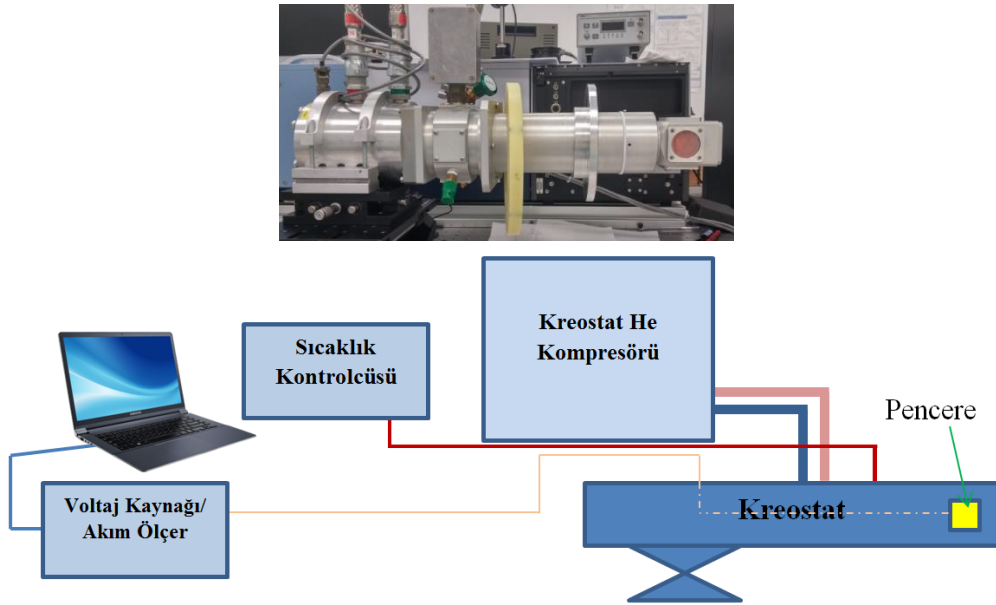
Sadece metal pencereleri açık bırakılmış olan örneklerin bütün yüzeyleri metallere kaplandığından lift-off adı verilen fotorezistin aseton içinde çözünerek üzerindeki metallere yüzeyden temizlenerek sadece kontak bölgelerinde metallere kalır. P-tipi numuneler için metal kapladıktan sonra doğrudan tel bağlama işlemi yapmak yeterlidir. Ancak n-tipi metal kaplamaları tamamlanan numunelerin kontaklarının aktif hale gelmesi için hızlı ısı tavlama (RTP, rapid thermal annealing) cihazında (Annealsys AsOne 100) azot gazı ortamında 425 °C sıcaklıkta 60 saniye tavlama yapılmıştır.

Kontak bölgelerinin metal kaplaması tamamlanan numuneler istenen boyutlarda bölüldükten sonra oda sıcaklığında katılaştıran ve elektriksel olarak yalıtıkan olan özel bir reçine ile Şekil 3.11'de b ve c'de ki görselde verildiği gibi 16 ayaklı metal paket (DIP) üzerine yapıştırılır. Daha sonra tel bağlama cihazı (TPT HB16) yardımıyla 25 µm

kalınlıktaki altın tel kullanılarak numunelerin kontak bölgeleri paketin bacaklarına bağlanır.

3.4. Akım-Voltaj (I-V) Ölçüm Sistemi

Üretilen aygıtların herhangi bir optik uyarıcı olmadan düşük sıcaklıklarda akım – voltaj (I-V) (karanlık akım) ölçümleri Şekil 3.12’de gösterilen düzenekte yapılmıştır. CRYO DE-20452 kapalı devre He kreostat sistemi içine yerleştirilip kablo bağlantıları yapılan aygıtların düşük sıcaklıkta (6K) Keithley 2635A I-V kaynak/ölçer cihazı yardımıyla karanlık akım – voltaj karakterizasyonları yapılmıştır. Aynı düzenekte kreostata takılan görünür bölge geçirgen pencerelerden (CaF₂) örnek üzerine uygulanan düşük şiddetli lazer ışığı uyarımı altında akım - voltaj ölçümleri de yapılmıştır. Bütün ölçümler için LabView kullanılarak yazılan ölçüm programı kullanılmıştır.



Şekil 3.12 I-V ölçüm sisteminin bileşenleri. Üstte ölçümlerde kullanılan kreostatın fotoğrafı verilmiştir. Altta güç kaynağı/akımölçer, sıcaklık kontrolcüsü ve kreostattan oluşan ölçüm sisteminin şematik görünümü verilmiştir

3.5. Optik Karakterizasyonlar

Büyütülen örneklerin optik karakterizasyonları, fotoluminesans (PL, photoluminescence), soğurma ve fototepki ölçümleriyle yapılmıştır. Elde edilen bilgiler yardımıyla yeni örnekler üretilmiş ve süreç optimize olana kadar devam edilmiştir.

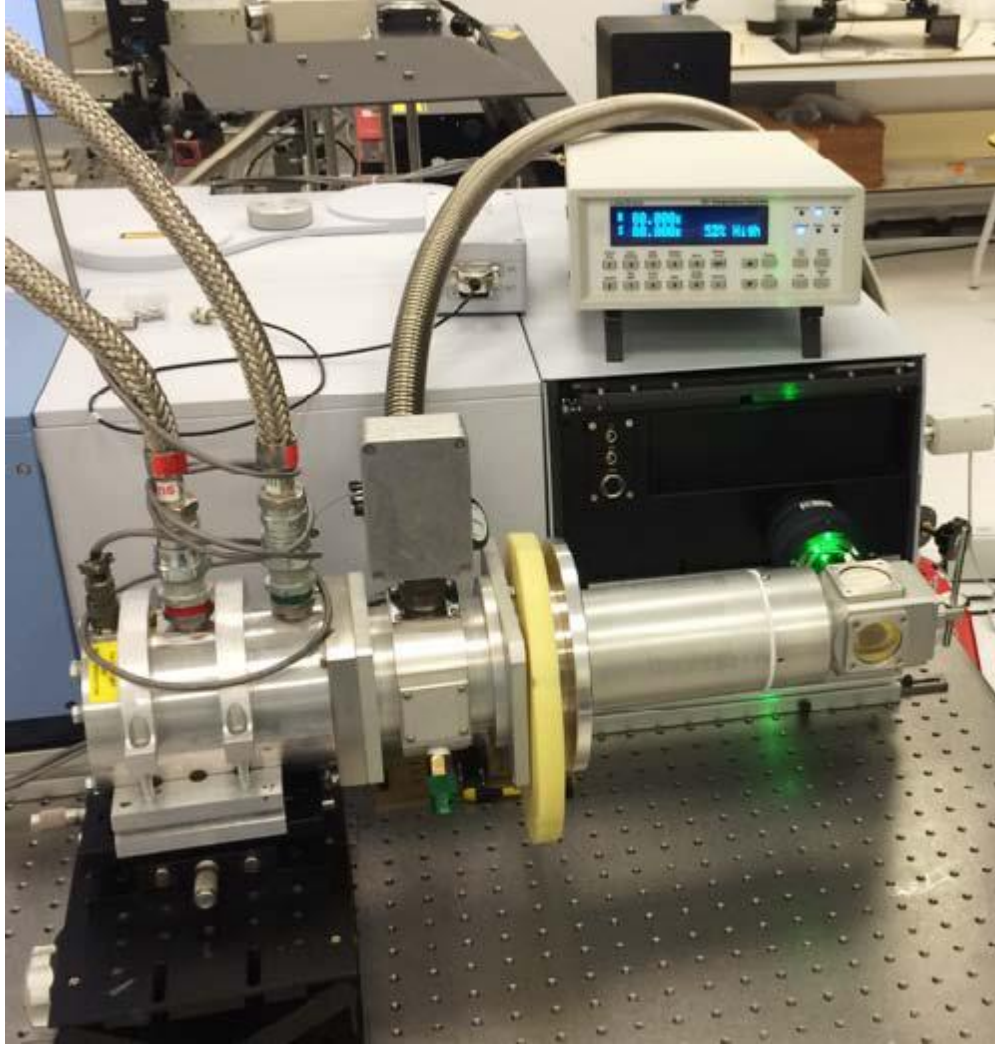
3.5.1. Fotoluminesans ölçümleri

Fotoluminesans, yarıiletken malzemenin yasak bant aralığından daha büyük enerjiye sahip fotonlarla uyarılması sonucu, değerlik bandından bir elektronun iletkenlik bandına geçerek elektron-boşluk çifti oluşturması ve tekrar değerlik bandına dönerken yani elektron-boşluk birleşimi sonucu ışımaya yapması olayıdır. Elde edilen bu ışımının enerjisi yarıiletken malzemenin yasak bant aralığı kadardır. Bu nedenle, doğrudan bant yapısına sahip yarıiletken malzemelerin yasak bant aralığının belirlenmesinde etkin bir yöntemdir. Bu ölçüm yönteminde genellikle tek dalgaboylu lazer ışığı uyarıcı olarak kullanılır ve örnekten yayılan ışımaya bir mercekle toplanarak dedektöre gönderilir. Elde edilen spektrum ölçümünde PL doruğunun genişliği üretilen yarıiletken malzemenin kristal kalitesinin ve optik kusurlarının göstergesidir [13,42,64-65].

Bu tez çalışmasında, PL ölçümleri için 100 mW optik güce sahip 532 nm dalgaboylu lazeri bulunan FTIR Bruker VERTEX 80v sistemine bağlı PL modülü kullanılmıştır. Bu sistemde lazer ışığının, dedektörü doyuma ulaştırmasını önlemek amacıyla optik yol üzerinde 632 nm kesim dalgaboylu filtre kullanılmıştır. Düşük sıcaklık ve sıcaklık bağımlı ölçümler genel olarak CaF₂ pencere takılı kreostat kullanılarak yapılmıştır.

Büyütülen örneklerin üzerinde hiçbir işlem yapmaya gerek kalmadan PL ölçümü yapılabilmesi, hızlı geribildirim alınmasını sağlamıştır. AlGaAs için yapılan büyütme kalibrasyonu çalışmalarında bu epikatman tabakaların yasak bant aralıkları PL ölçümleri sonucunda belirlenmiş buradan da alaşım konsantrasyonları çıkartılmıştır. Büyütülen çoklu kuantum kuyuların PL ölçümlerinden elde edilen doruklar, iletim bandındaki ve değerlik bandındaki kuantum kuyu içi enerji seviyeleri (özellikle E₁→HH₁) arasındaki farka karşılık geldiğinden kuantum kuyular hakkında doğrudan bilgi vermektedir. Ayrıca bu dorukların genişlikleri, ardışık kuantum kuyuların

genişliklerinin aynılığı (uniformity) hakkında ek bilgi de verir. Çift engel tınlama tünelleme örnekleri için ayrıca voltaj bağımlı PL ölçümleri de yapılmıştır. Bu sistemde, aygıt haline getirilen ve optik pencereye sahip örneklerin üzerlerine voltaj uygulanarak PL etkinlikleri arttırılmış ve bu şekilde ölçümler alınmıştır. Şekil 3.13’de ölçümlerde kullanılan PL deney düzeneği verilmiştir.



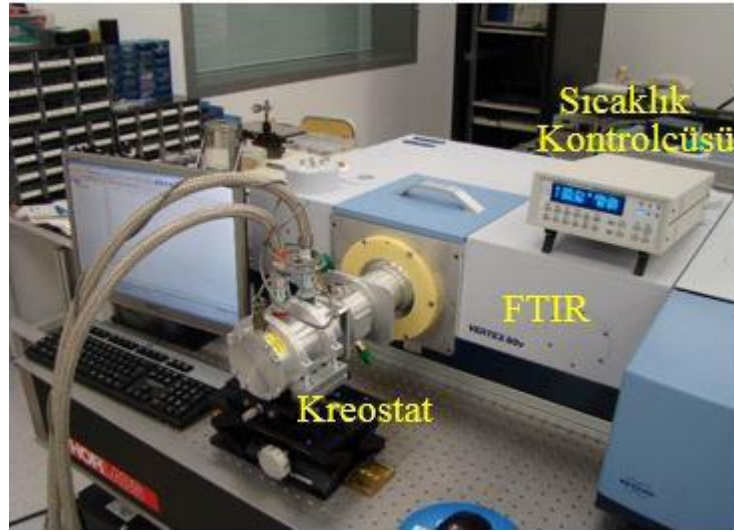
Şekil 3.13 Fotoluminesans ölçümlerinde kreostatla birlikte kullanılan FT-IR PL modülü deney düzeneği

Kaynak: [66]

3.5.2. Soğurma spektrumu ölçümleri

Soğurma ölçümleri, çıplak örnekler üzerine düşürülen geniş dalgaboyu aralığına sahip ışığın örnekten geçtikten sonra dedektörle algılanması esasına dayanır. Ölçümlerde, referans olarak genellikle yapının üzerine büyütüldüğü alttaş kullanılır; böylece, sadece büyütülen yapıdaki soğurma bölgeleri elde edilir.

Uzak kızılötesi (FIR, far infrared) bölge soğurma ölçümleri için Globar (NIR) ışık kaynağı, Mylar demet ayırıcı (beamsplitter) ve DTGS (DLaTGS D201) dedektör ile birlikte polietilen pencerelerin takıldığı kapalı devre He kreostat kullanılmıştır. Safsızlık atomlarından kaynaklı soğurmaları gözlemleyebilmek için safsızlık atomlarının ısı olarak iyonlaşmasını engellemek amacıyla ölçümler düşük sıcaklıkta (~6K) yapılmıştır. FIR bölgede atmosferik soğurma yüksek olduğundan kreostatın örneklerin bulunduğu bölümü FTIR sistemi içine özel bir kapak yardımıyla yerleştirilerek ölçümler vakum altında yapılmıştır. Kullanılan deney düzeneği Şekil 3.14’te verilmiştir.

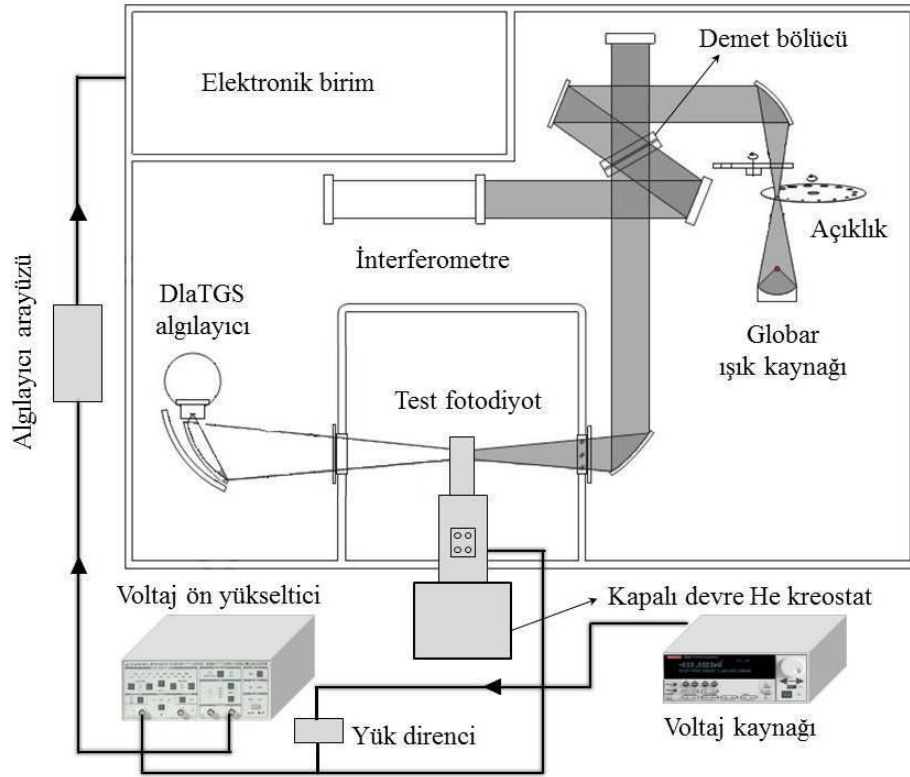


Şekil 3.14 Soğurma ölçümlerinde kullanılan deney düzeneği

Kaynak: [67]

3.5.3. Tayfsal fototepki ölçümleri

Aygıt haline getirilip paketlenen tek piksel algılayıcı yapıların tayfsal fototepki ölçümleri ~ 9 K sıcaklıkta yapılmıştır. Atmosferik soğurmanın yüksek olduğu FIR bölgede ölçümler yapıldığı için Şekil 3.15’de gösterildiği gibi kreostat FTIR sisteminin içine yerleştirilip ölçümler vakum altında alınmıştır. Globar ışık kaynağı ile birlikte Mylar çokkatman (multilayer) demet ayırıcı kullanılmıştır. Kreostat başlığı dönebildiğinden odaklama yapılırken KBr pencereler, ölçüm sırasında ise polietilen pencereler kullanılmıştır. FIR ışık kaynağı tarafından uyarılan aygıtta uyarılan elektronların kontak bölgelerine sürülebilmesi için gerilim uygulanmıştır. Elde edilen sinyallerdeki sinyal/gürültü oranını arttırmak amacıyla yük direnciyle birlikte voltaj yükseltici kullanılmıştır.



Şekil 3.15 Tayfsal fototepki ölçümlerinde kullanılan deney düzeneği ve FTIR içindeki optik yol

Kaynak: [66]

4. MOLEKÜLER DEMET EPİTAKSİ SİSTEMİ TEMEL BÜYÜTME PARAMELERİ ve DELTA KATKILAMA ÇALIŞMALARI

Tez kapsamında yapılan büyütmelerin tamamı yüksek vakum altında çok ince katman kalınlıklarının hassasiyetle elde edilebildiği ve efüzyon hücrelerde yüklü olan malzeme miktarları gramlarla ifade edildiği MBE sistemiyle yapılmıştır. Bu malzemeler kristal büyüme esnasında $\sim 10^{-7}$ torr mertebesinde kısmi basınçlar oluşturacak kadar az miktarda buharlaşmaktadır. Bu değerlerin çok küçük değişimleri dahi (malzeme akıları, V/III oranları ve büyüme sıcaklığı gibi) büyütülen örneklerin (tabaka kalınlıkları, alaşım oranı ve katkı konsantrasyonu gibi) özelliklerinin değiştirebilmektedir. Bu nedenle yapılacak çalışmaların başlangıcında iyi bir kalibrasyon yapılması ve devam ettiği süreç boyunca sürekli değişimlerin gözlemlenmesi (örneğin aynı hücre sıcaklığında malzeme miktarının azalmasıyla akının azalması gibi) ve gerekli düzeltmelerin (malzeme akısını korumak için hücre sıcaklığını arttırmak gibi) yapılması gerekmektedir. Özellikle de bu çalışmadaki gibi birkaç nm mertebesindeki değişimin sorun yaratacağı durumlarda sistem parametrelerinin sürekli denetim altında tutulması kaçınılmazdır. Ancak MBE gibi sistemler çok karmaşık sistemlerin bir araya gelmesinden meydana geldiği için ciddi problemler ile karşılaşılması kaçınılmaz olmaktadır. Bu tez çalışması boyunca birkaç defa sistem bakımı yapılması gerekmiş olup bundan dolayı zorunlu olarak her sistem bakımından sonra kalibrasyonlar hassas şekilde tekrarlanmıştır. Fakat buna rağmen bazı durumlarda önceki kalibrasyonlar ile sonrakiler arasında küçük farklılıklar meydana gelmiştir. Bunun sonucu olarak örneğin kuantum kuyu genişliklerinde oluşan küçük farklılıklar örneklerin kıyaslanabilmesinde zorluklar oluşturmuştur. Ancak her bir örnek için çoklu kuantum kuyu ve safsızlık bağlanma enerjisi programları kullanılarak yapılan teorik hesaplamalar yardımıyla bu değişimlerden bağımsız olarak örnekler kıyaslanabilmiştir. Bu programlar Doç. Dr. Hasan Yıldırım tarafından Matlab programlama diliyle oluşturulmuş ve bu tez çalışması boyunca aktif olarak kullanılmıştır [41].

Bu bölümde, tez kapsamında oluşturulması gereken kuantum kuyulu yapıların kararlı şekilde büyütülebilmesi için kritik olan parametrelerin sırasıyla Ga ve Al hücre sıcaklıklarına bağlı olarak GaAs ve AlGaAs büyüme oranı, AlGaAs alaşım oranı ve katkı malzemeleri için (Si ve Be) hücre sıcaklığına bağlı olarak katkı konsantrasyonlarının belirlenmesi basamaklarına kısaca değinilmiştir. Büyütülen

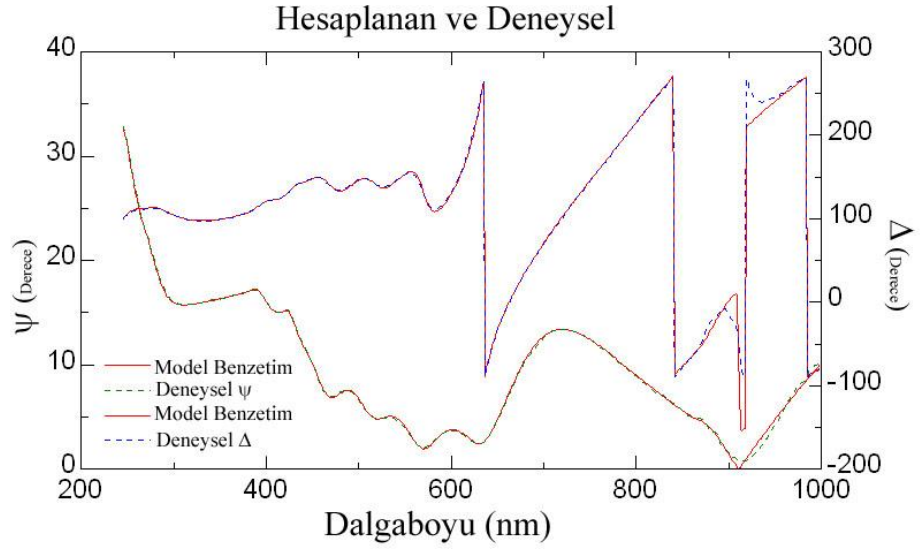
örneklerin XRD, XRR ve SE cihazlarıyla yapılan yapısal karakterizasyonları ve PL ölçümleriyle yapılan optik karakterizasyonları anlatılmış ve asıl üretilmek istenen çok tekrarlı kuantum kuyulu yapıların büyütülmesi koşulları için elde edilen veriler sunulmuştur. Elde edilen bu bilgiler yardımıyla bu çalışmada temel hedef olan kuantum kuyuların içinde tek atomik katman olarak safsızlık atomlarının yerleştirilmesi yani delta katkılama işleminde kullanılacak büyütme parametreleri belirlenmiştir.

4.1. GaAs ve AlAs MBE Temel Büyütme Parametreleri Kalibrasyonları

Başlangıç olarak RHEED yardımıyla GaAs ve AlAs için büyütme hızları kabaca belirlendikten sonra Ga ve Al için iki farklı hücre sıcaklığı kullanılarak ikişer epikatman tabaka GaAs alttaş üzerine büyütülmüştür. Büyütülen örneğin tabaka kalınlıkları spektroskopik elipsometre (SE) yöntemleriyle alınan ölçüm sonuçlarına benzetim işlemi uygulanarak belirlenmiştir. SE sisteminde WVASE32 programıyla yapılan benzetim işleminin sayısal sonuçları Tablo 4.1’de ve grafiksel sonucu Şekil 4.1’de verilmiştir. Tabaka kalınlığının o tabakanın büyütülmesi için geçen süreye bölünerek her bir malzeme için iki farklı hücre sıcaklığı kullanılarak büyüme hızı belirlenmiştir.

Tablo 4.1 Büyüme hızı kalibrasyon örneği için SE yöntemiyle elde edilen sayısal sonuçlar

Katman	Süre (dk)	Büyütme Sıcaklığı (°C)	SE Sonuçlar (nm) (MSE:24)	Büyüme Hızı (ML/s)
GaAs-Oksit	-	-	0,89 ± 0,013	-
GaAs	12	610	161,04 ± 0,07	0,79
AlAs	10	610	88,57 ± 0,14	0,52
GaAs	15	610	132,72 ± 0,19	0,52
AlAs	13	610	66,98 ± 0,42	0,30
Tampon	90	590		
SI GaAs Alttaş				

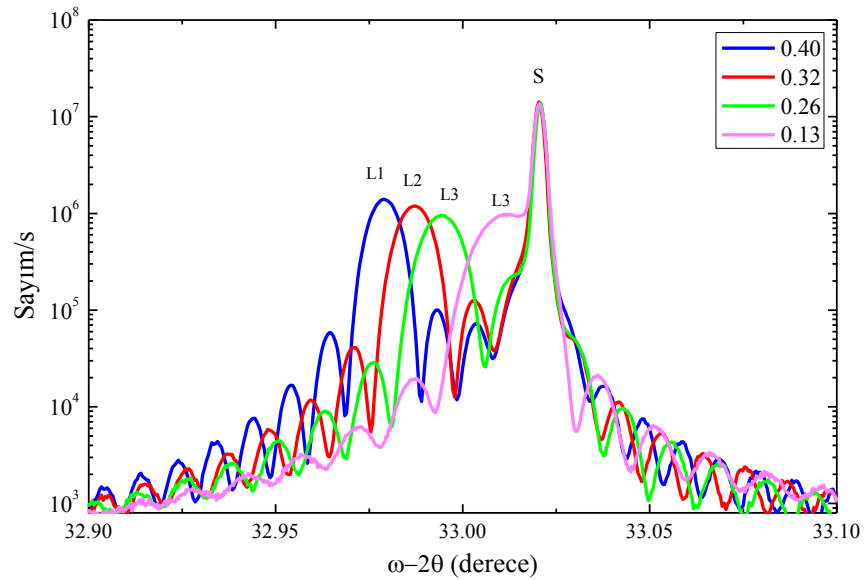


Şekil 4.1 Büyüme hızı kalibrasyon örneği için SE yöntemiyle elde edilen ölçüm ve benzetim sonuçları

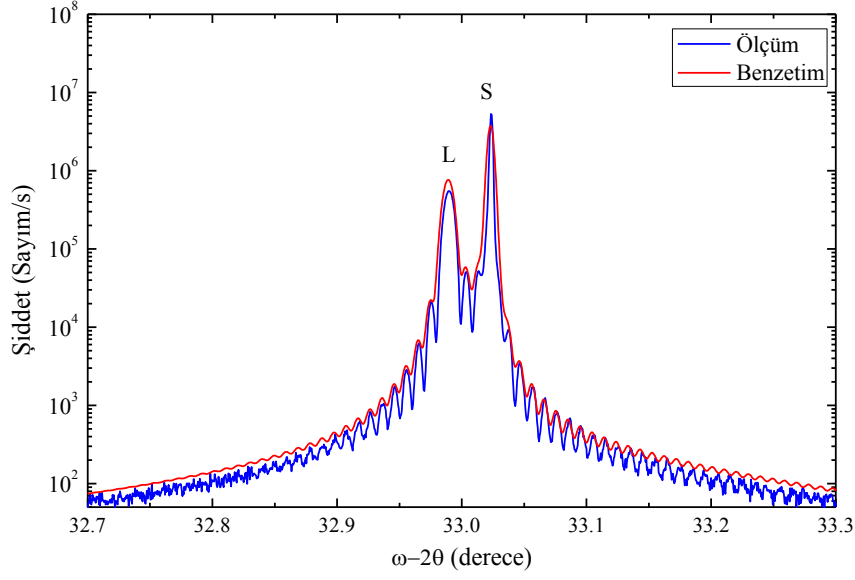
4.1.1. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ büyüme hızı ve alaşım oranı kalibrasyonu

Büyüme oranları (BO) ile alaşım oranları (x) arasındaki $BO_{\text{Alas}} = (x)/(1-x)BO_{\text{GaAs}}$ deneysel bağıntısı yardımıyla elde edilmek istenen alaşım oranı için hangi büyüme oranlarının kullanılacağı belirlenmiştir. GaAs alttaş üzerine tek katman AlGaAs büyütülen örneklerde XRD sallantı eğrisi (RC) ve SE ölçümleriyle birlikte oda sıcaklığı fotoluminesans (PL) yöntemleri kullanılmıştır. Örneklerin PL ölçümlerinden yasak bant aralığının belirlenmesi işleminde ($x \leq 0,45$ doğrudan bant yapısına sahip tabakalar için) kolaylık sağlaması için düşük düzeyde Si katkılanarak ($\sim 5 \times 10^{17} \text{ atom/cm}^3$) ölçümlerde ışın şiddetinin artırılması hedeflenmiştir. Özellikle yüksek Al konsantrasyonlarına sahip örneklerde XRD RC yöntemi alaşım oranını belirlemede kullanışlı olmasına rağmen (Denklem 3.3 ve Denklem 3.4 kullanılarak hesaplanabilir) düşük alaşım konsantrasyonu durumunda Şekil 4.2’de GaAs alttaş için S (alttaş, Substrate) ve AlGaAs tabakaları için L (katman, Layer) ile gösterilen (0 0 4) düzlemi tepeleri birbirlerinin içine girdiğinden alaşım oranını belirlemede sıkıntı yaşanmaktadır. Bu durumda düşük alaşım konsantrasyonu sahip AlGaAs örneklerin PL ölçümlerinden daha kesin sonuçlar elde edilmektedir. Ancak Al oranı yüksek alaşım örneklerde AlGaAs bant yapısı doğrudan olmayan bant yapısına dönüşmeye başlayacağından ve PL ölçümlerinde genel olarak kullanılan 632 nm lazer ile

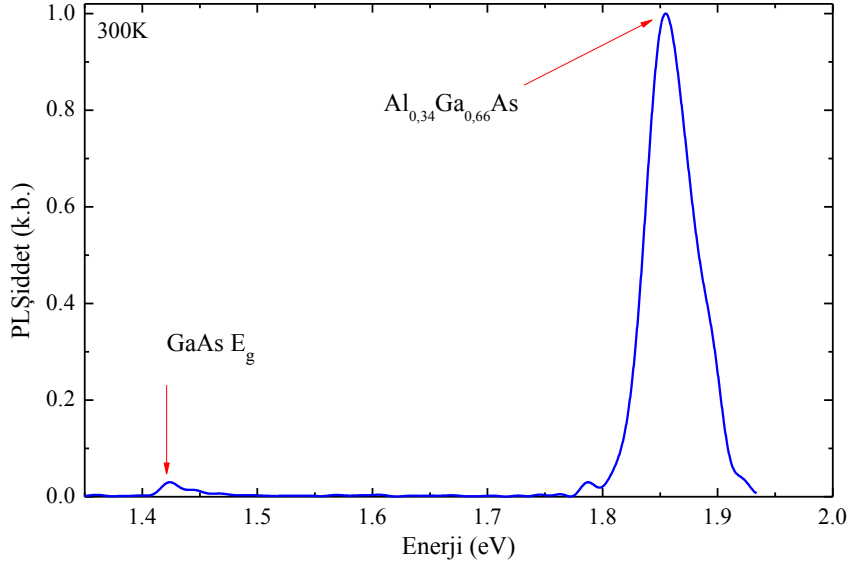
çakıştığından (300K’de Denklem 2.5 kullanılarak $x \geq 0,43$ için AlGaAs tepesi $\lambda_{AlGaAs} \leq 633 \text{ nm}$ elde edilmektedir.) PL ölçümlerinden yasak bant aralığını belirlemek zorlaşacaktır. Bu yöntemler kıyaslandığında alaşım oranı PL yöntemiyle HRXRD’den daha hassas belirlenebilmektedir [68]. SE elipsometre yöntemi çok hızlı sonuç vermesine karşın hata payı yüksektir. Bu nedenlerle sabit GaAs büyüme hızı kullanılarak (Ga hücre sıcaklığına) Al hücre sıcaklığına bağlı olarak Al alaşım oranı eğrisi elde edebilmek için bahsi geçen üç yöntem de kullanılmıştır. Şekil 4.3’te (0 0 4) düzleminden alınan yüksek çözünürlüklü XRD RC ölçüm sonuçlarından S (GaAs tepesi) ve L (AlGaAs tepeleri) tepeleri arasında kalan açı değerinden faydalanılarak Denklem 3.3 ve 3.4 kullanılarak alaşım oranı belirlenmiştir. Diğer ölçüm yöntemlerine ek olarak sallantı eğrisi ölçümlerinde elde edilen saçaklar üzerinden kalınlık hesabı yapılmıştır. Ayrıca kalınlık ve alaşım oranı bilgileri Epitaxy programında kullanılarak benzetim işlemi uygulanarak elde edilen bilgiler teyit edilmiştir. Şekil 4.4’te ise oda sıcaklığında alınan PL ölçümleri yardımıyla grafikte gösterilen tepeler arasındaki enerji farkı yardımıyla Denklem 2.6 kullanılarak Al alaşım oranları belirlenmiştir.



Şekil 4.2 GaAs alttaşlar üzerine büyütülen farklı Al alaşım oranına sahip AlGaAs epikatman örnekler için GaAs (0 0 4) düzleminde alınan yüksek çözünürlüklü ω - 2θ ölçüm sonuçları



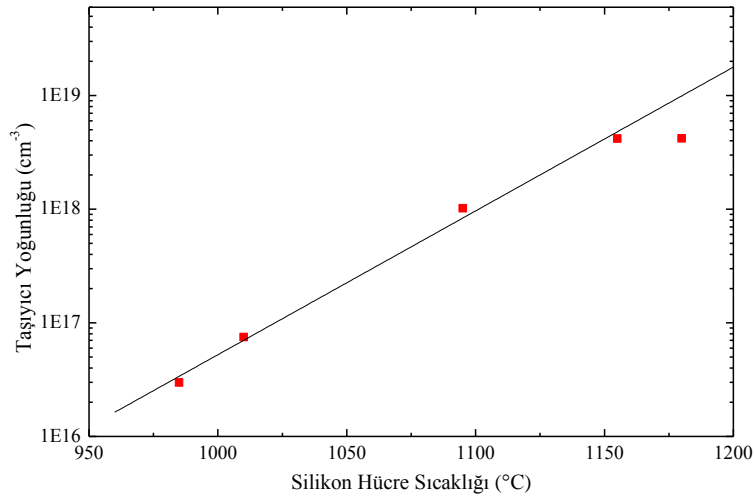
Şekil 4.3 GaAs alttaş üzerine büyütülen AlGaAs epikatman örnek için GaAs (0 0 4) düzleminde alınan yüksek çözünürlüklü $w-2\theta$ sallantı eğrisi (RC) ölçüm ve Epitaxy programında yapılan benzetim sonuçları



Şekil 4.4 GaAs alttaş üzerine düşük konsantrasyonda Si katkılanarak büyütülen AlGaAs epikatmanın oda sıcaklığında alınan PL ölçüm sonucunun normalize edilmiş grafiği. GaAs alttaşın gelen sinyal 1,42 eV ve AlGaAs tabakadan gelen sinyal 1,85 eV değerindedir

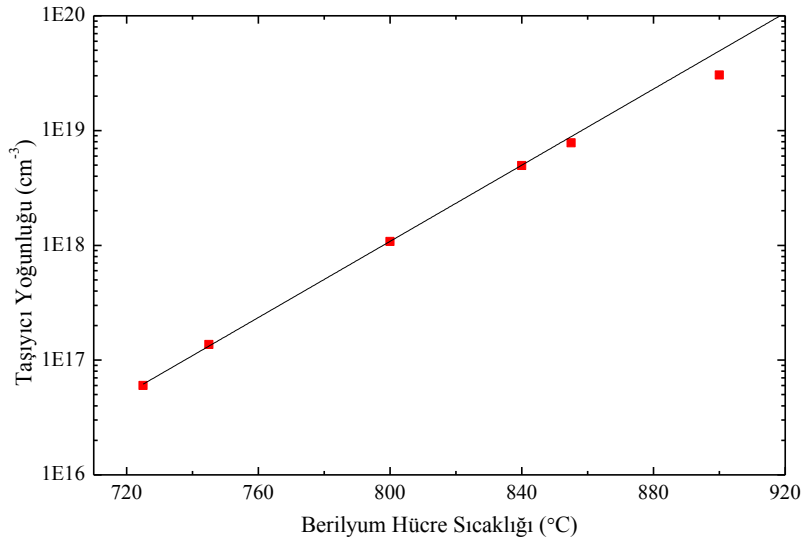
4.1.2. Si ve Be katkı konsantrasyonu kalibrasyonları

Sabit katkı hücresi sıcaklığı için birim hacme yerleştirilen katkı atomu sayısı GaAs'ın büyüme hızıyla ters orantılı olarak bağlantılı olduğundan GaAs'ın büyüme hızı belirlendikten sonra Si ve Be katkı malzemelerinin katkı kalibrasyonları yapılmıştır. GaAs alttaşlar üzerine tampon tabaka büyütüldükten sonra katkı hücresinin kepengi açılarak büyütme işlemine devam edilmiştir. GaAs malzeme sistemi içindeki Si ve Be katkı miktarlarının, efüzyon hücre sıcaklıklarının bir fonksiyonu olarak belirlenebilmesi için kalın, katkılı GaAs kontrol-kalibrasyon örnekleri büyütülmüştür. Van der Pauw yöntemiyle yapılan Hall ölçümlerinden elde edilen sonuçlar Si için Şekil 4.5'te ve Be için Şekil 4.6'da grafik olarak sunulmuştur. Elde edilen hücre sıcaklığına bağlı katkı konsantrasyonu eğrileri delta katkılama çalışmaları için kullanılmıştır. GaAs büyüme oranının değişmesi durumunda dahi elde edilen bilgiler yardımıyla büyüme hızıyla ters orantı kurularak katkı seviyeleri sabit tutulabilmiştir.



Şekil 4.5 GaAs sabit büyüme oranı için Si hücre sıcaklığına karşılık katkı konsantrasyonu

Si için katkı miktarı $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ üzerine doğru çıkıldıkça, yapıda Si-As arasındaki p tipi yapılanmadan dolayı ölçülen aktif katkı miktarında azalma meydana gelmektedir [69]. Şekil 4.5'de görülen yüksek sıcaklıktaki verinin lineer eğriden ayrılmasının sebebi budur.



Şekil 4.6 *GaAs* sabit büyüme oranı için *Be* hücre sıcaklığına karşılık katkı konsantrasyonu

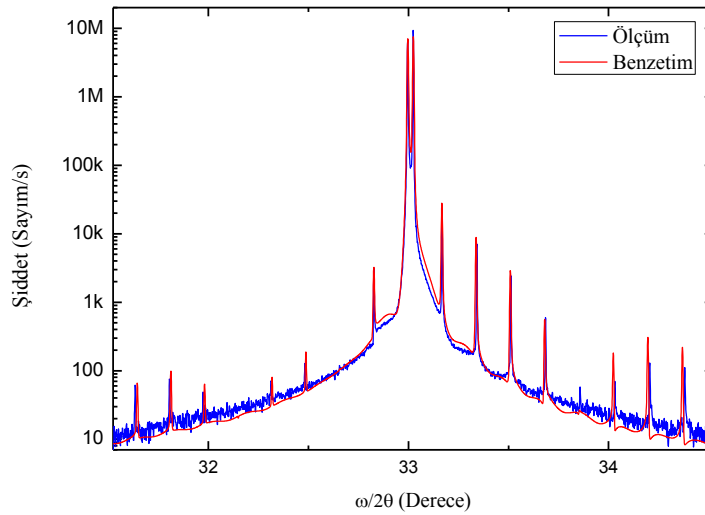
4.1.3. MQW yapıların büyütülmesi ve Hassas büyütme hızı kalibrasyonu

MBE sisteminde belirlenen Ga hücre sıcaklığına bağlı kullanılacak Al alaşım oranı ve katkı konsantrasyonu gibi temel parametreler belirlendikten sonra GaAs ve AlGaAs hassas büyüme oranları için grup örnekler büyütülmüştür. Hedef büyütme parametreleri Tablo 4.2’de verilen kuantum kuyu merkezleri delta (δ) katkılı farklı kuyu ve engel genişlikli çoklu kuantum kuyu yapılar GaAs alttaş üzerine büyütülmüştür. Tampon tabaka ve 50 tekrarlı GaAs/AlGaAs tabakalar için 590 °C büyütme sıcaklığı ve her iki malzeme için BEP_V/BEP_{III} oranı ~15 olarak kullanılmıştır. HRXRD sisteminde detaylı yapısal karakterizasyonlara tabi tutulmuşlardır. Her bir örneğin HRXRD sisteminde sallantı eğrisi (RC) ölçümü alınarak X’Pert Epitaxy programında ölçüm sonuçlarına benzetim işlemi uygulanarak sonuçlar analiz edilmiştir. Şekil 4.7’de NB301 kod numaralı çoklu kuantum kuyu örneği için yapılan RC ölçüm sonucu ve bu ölçüme yapılan benzetim sonucu grafik olarak sunulmuştur. Örnekler için RC ölçümlerinden elde edilen periyot kalınlıkları (bir GaAs ve bir AlGaAs tabakanın toplam kalınlığı) Tablo 4.3’te sunulmuştur. Yine her bir örnek için XRR ölçümleri yapılmış ve ölçüm sonuçları X’Pert Reflectivity programında benzetim işlemine tabi tutularak tabaka kalınlıkları ve arayüz pürüzlülükleri belirlenmiştir. Örnek olması bakımından NB301 kod numaralı örnek için yapılan XRR ölçüm ve yapılan benzetim işleminin sonucu

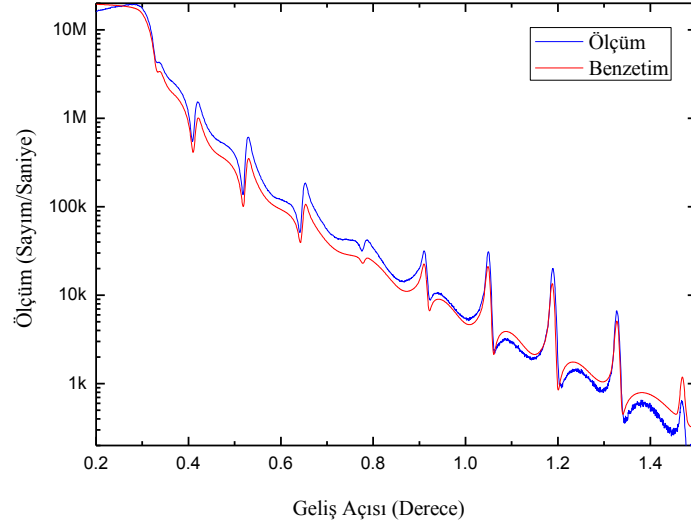
grafik olarak Şekil 4.8’de sunulmuştur. GaAs ve AlGaAs tabakaların kalınlıkları ve bu tabakalar arasındaki arayüz pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. 50 tekrarlı bu yapı için her bir GaAs ve AlGaAs tabaka çiftinin toplam kalınlıkları RC ölçümlerinden elde edilen periyot kalınlığı değerleri ile kıyaslanmıştır. Elde edilen bu sayısal sonuçlar Tablo 4.3’te sunulmuştur. İki farklı x-ışını ölçüm yöntemiyle elde edilen bilgiler kıyaslanmış ve sonuçların tutarlı olduğu belirlenmiştir.

Tablo 4.2 Büyütülen hassas kalınlık kalibrasyon örneklerinin MBE büyüme parametreleri

Örnek Kodu	δ -Katlı Miktarı (cm^{-2})	δ -Katlı Süresi (s)	Kuyu Genişliği (nm)	Engel Genişliği (nm)
NB301	$3,0 \times 10^{10}$	1,34	6	25
NB302	$1,0 \times 10^{11}$	4,48	10	25
NB303	$3,0 \times 10^{10}$	1,34	6	8



Şekil 4.7 50 tekrarlı hassas büyüme hızı kalibrasyon örnekleri için GaAs (004) düzleminde yapılan XRD w - 2θ ölçüm sonuçları ve yapılan benzetim işlemleri sonuçları



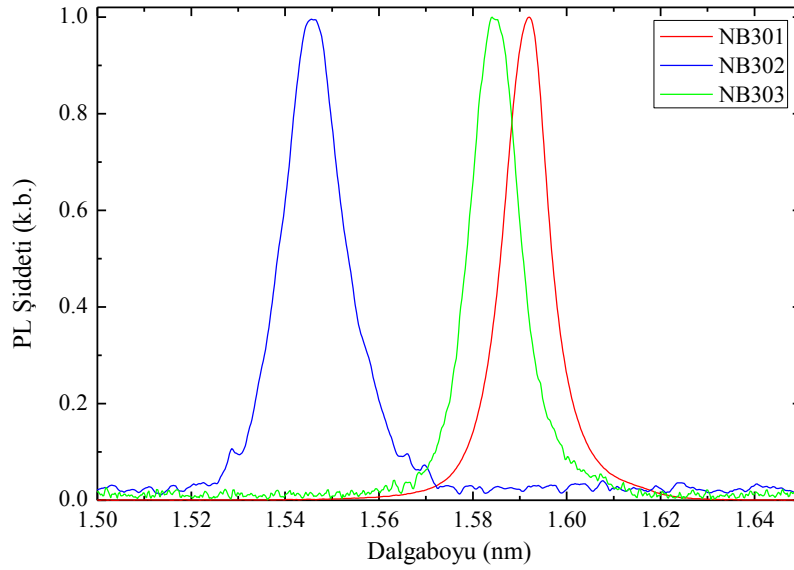
Şekil 4.8 50 tekrarlı hassas büyüme hızı kalibrasyon örnekleri için yapılan XRR ölçüm sonuçları ve yapılan benzetim işlemi sonuçları

Tablo 4.3 Hassas kalınlık kalibrasyon örnekleri için RC ve XRR ölçümlerine benzetim işlemi uygulanarak elde edilen sayısal sonuçlar

Örnek	RC	XRR			
	Periyot kalınlığı (nm)	Kuyu genişliği (nm)	Engel Genişliği (nm)	Şapka (nm)	Pürüzlülük (nm)
NB301	30,7 ± 0,3	5,74	24,96	33,2	0,20
NB302	35,0 ± 0,4	9,78	24,88	34,4	0,31
NB303	14,1 ± 0,2	5,79	8,28	35,2	0,12

Büyütme detayları Tablo 4.2’de verilen örnekler aynı zamanda delta katkılama çalışmalarında da kullanılmak üzere Si hücre sıcaklıkları aynı kalacak şekilde fakat farklı sürelerde kuyu merkezleri delta katkılanmıştır. Ancak bu örnek grubunda GaAs ve AlGaAs tabakalarının ideal kristal büyüme parametreleri hedeflendiği için ideal delta katkılama koşullarından uzaklaşmıştır. Özellikle yüksek sıcaklıklarda difüzyonun artışıyla delta katkıdan uzaklaşmıştır. Bu örnek grubu için sonuçları Şekil 4.9’da verilen düşük sıcaklık PL ölçümlerinin sonuçları XRD ölçümlerinden elde edilen tabaka kalınlık değerleri kullanılarak yapılan hesaplama sonuçlarıyla kıyaslanarak farklı yöntemlerden elde edilen bilgiler doğrulanmıştır. Tablo 4.4’de $E_1 \rightarrow HH_1$ (iletim bandı kuantum kuyu temel enerji

seviyesinden (E_1) değerlik bandı kuantum kuyu ağır boşluk temel seviyesi (HH_1) geçişine karşılık gelen ana PL tepesi konumundan elde edilen değerler için engel genişliği ölçüm ve sıcaklığı gibi bilgiler de hesaba katılarak yapılan kuramsal hesaplamalardan elde edilen kuyu genişlikleri verilmiştir. Ancak kuyu genişlikleri için elde edilen değerler XRR sonuçlarından $\sim 0,4$ nm farklı çıkmıştır. Bu farkın muhtemel sebebi PL ölçümlerinde 100 mW güç altında sıcaklığın 9 K değerinin üzerine çıkması ve/veya XRR sonuçlarında arayüz pürüzlülük değerlerinin hesaba katılmamış olmasıdır. Fakat genel olarak ölçüm yöntemlerinden elde edilen bilgiler birbirleriyle uyum içindedir.



Şekil 4.9 50 tekrarlı hassas büyüme hızı kalibrasyon örnekleri için 9 K sıcaklıkta 100 mW şiddetli 532 nm dalgaboylu lazer uyarımı altında yapılan PL ölçüm sonuçları

Tablo 4.4 Hassas kalınlık kalibrasyon örnekleri için 9 K sıcaklıkta alınan PL ölçümlerinden elde edilen sayısal sonuçlar

Örnek Kodu	$E_1 \rightarrow HH_1$ (eV)	FWHM (meV)	Hesaplanan L_w (nm)
NB301	1,5974	11,2	6,1
NB302	1,5515	14,9	10,1
NB303	1,5934	12,4	6,2

4.2. Büyütme Sıcaklığının Delta Katkılamaya Etkisi

Büyütme sıcaklığının delta katkılamaya etkisi süperörgü ve çoklu kuantum kuyu örnekler üzerinden çalışılmıştır. Çalışmanın başlangıç aşamalarında büyütülen süperörgü yapılardan elde edilen bilgiler kullanılarak delta katkılama tekniği geliştirilmiştir.

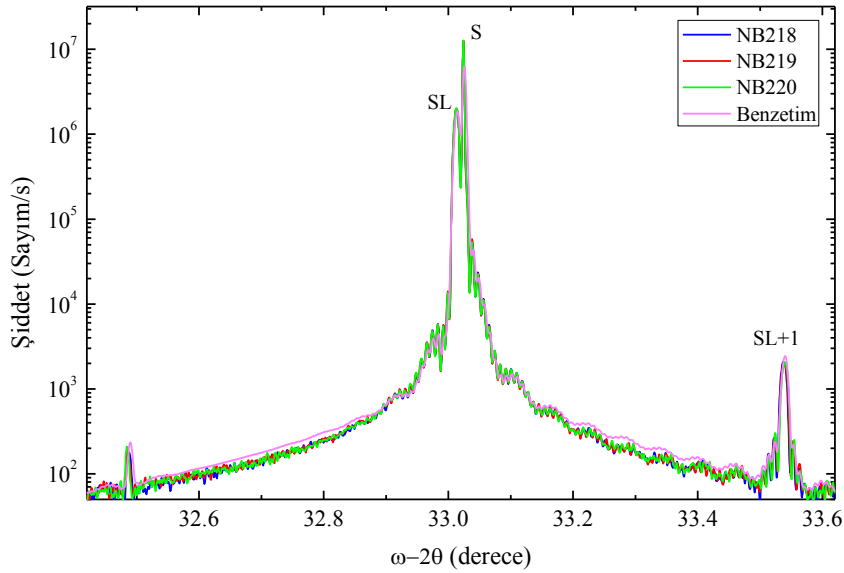
4.2.1. Süperörgü örnekler üzerinden karakterizasyon

Moleküler demet epitaksi sisteminde yapılacak büyütme ve delta katkılama işlemleri için büyütme sıcaklığı çok önemli bir parametredir. GaAs ve AlGaAs malzemelerinin kristal kalitesini yüksek ve optik/elektriksel kusurlardan arındırılmış olarak büyütülebilmesi için genellikle yüksek sıcaklıklarda büyütme yapılması gerektiği ve delta katkılamada difüzyonu azaltmak amacıyla düşük sıcaklıkların tercih edilmesi gerektiğine Bölüm 2.2.2’de ve Bölüm 3.1.2’de değinilmiştir. Bahsi geçen nedenler göz önünde bulundurularak GaAs tampon tabakanın büyütülmesinin sonrasında hem kristal kalitesini korumak hem de delta katkılamada difüzyonu düşük düzeyde tutmak amacıyla ideal bir büyütme sıcaklığı belirlemek amacıyla 50 tekrarlı süperörgü yapıdan oluşan bir örnek grubu oluşturulmuştur. Kuantum kuyu merkezleri Si atomlarıyla $2,0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ mertebesinde delta katkılanan bu örnek grubunun engel bölgeleri $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ malzemesi ile oluşturulmuştur. MBE sisteminde kullanılan büyütme parametreleri Tablo 4.5’te verilen üç tane örnekte diğer bütün parametreleri aynı tutulmak şartıyla tampon tabakadan sonraki büyütme sıcaklıkları değiştirilmiştir.

Tablo 4.5 Delta katkılama sıcaklığını belirlemek amacıyla oluşturulan 50 tekrarlı süperörgü örnek grubu için MBE sisteminde kullanılan büyütme parametreleri

Örnek Kodu	Büyütme Sıcaklığı (oC)	δ -Katkı (cm^{-2})	Kuyu Genişliği (nm)	Engel Genişliği (nm)
NB218	540	$2,0 \times 10^{10}$	6	5
NB219	490	$2,0 \times 10^{10}$	6	5
NB220	440	$2,0 \times 10^{10}$	6	5

Büyütülen örnekler için HRXDR ölçüm sisteminde $w-2\theta$ ölçümleri yapılmış ve bu sonuçlara aynı zamanda benzetim işlemi uygulanmıştır. Örneklerin HRXRD ölçüm sonuçları Şekil 4.10'da ve ölçüm sonuçlarından elde edilen sayısal veriler Tablo 4.6'da sunulmuştur. Sayısal sonuçlar kıyaslandığında periyot kalınlığındaki hata payının büyütme sıcaklığıyla ters orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun olası sebebi arayüz pürüzlülüğünün artması olarak değerlendirilmiştir. Ancak kristal kalitesinin asıl göstergesi olan süperörgü tepelerinin (Şekil 4.10'da SL ile gösterilen) yarı yükseklik tam genişliği (FWHM) değeri örnekler için neredeyse aynıdır. Burada alttaş tepelerinin (Şekil 4.10'da S ile gösterilen) FWHM değerleri referans olarak verilmiştir ve aynı seri alttaşlar için aynı değerlerdedirler. Yine benzer olarak $w-2\theta$ ölçümünün pozitif bölgesinde birinci saçağın FWHM değerleri (Şekil 4.10'da SL+1 ile gösterilen) kıyaslandığında da ciddi bir fark görülememiştir.



Şekil 4.10 50 tekrarlı süperörgü büyütme sıcaklığı grubu için yapılan GaAs (0 0 4) düzleminde XRD $w-2\theta$ ölçüm ve benzetim işlemi sonuçları

Büyütme sıcaklığı grubu örnekleri için 9 K sıcaklıkta yapılan PL ölçüm sonuçları Şekil 4.11'de ve bu sonuçlardan elde edilen sayısal veriler Tablo 4.6'da sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde aynı kuantum kuyu genişlikli bu örneklerin $E_1 \rightarrow HH_1$ geçişlerine karşılık gelen tepe konumlarındaki (Şekil 4.11'de siyah okla gösterilen) ufak

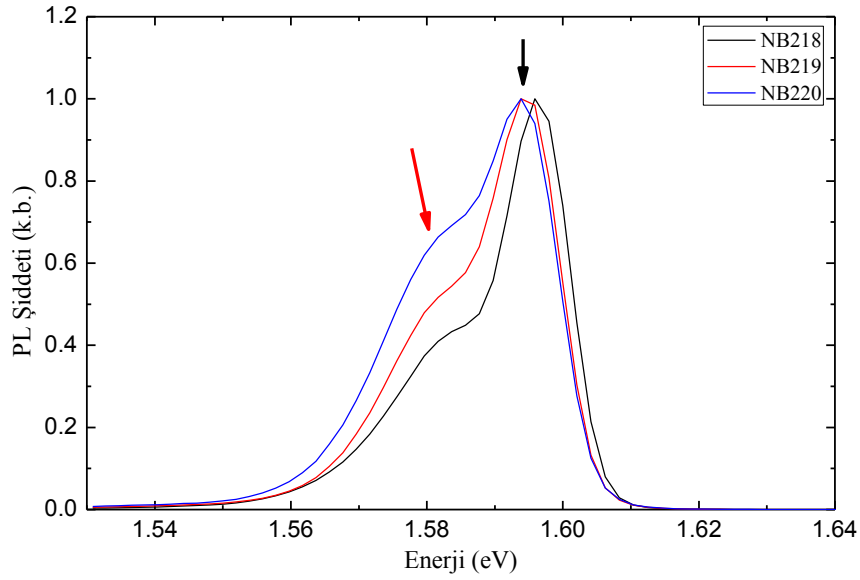
sapmalar olduğu görülmüştür ancak bu küçük farkların muhtemel sebebi ölçüm düzeneğinden kaynaklanan sıcaklık farklarıdır. Aynı lazer uyarım şiddeti altında yapılan PL ölçümlerinden MBE büyütme sıcaklığıyla ters orantılı olarak PL sinyallerinin değiştiği gözlenmiştir. Büyütme sıcaklığı 540 °C olan örneğin PL sinyali, büyütme sıcaklığı 490 °C olan örneğin PL sinyalinin 1,9 katı ve büyütme sıcaklığı 440 °C olan örneğin PL sinyalinin 3,3 katıdır. Bu durum büyütme sıcaklığının azalmasıyla örneklerin optik özelliklerinin kötüleştiğini göstermektedir. Ana PL tepesi için yapılan hesaplamalar kuyu genişliğini doğrulamaktadır ve bu bilgiler kullanılarak safsızlık bağlanma enerjileri için hesaplamalar yapıldığında 1s bağlanma enerjisi -12,8 meV ve 2p bağlanma enerjisi -2,4 meV olarak elde edilmiştir. Şekil 4.11’de verilen PL ölçüm sonuçlarından görülebileceği gibi $E_1 \rightarrow HH_1$ geçişlerine (Şekil 4.11’de siyah okla gösterilen) karşılık gelen ana tepenin düşük enerji tarafında $2p \rightarrow HH_1$ geçişine dair net bir belirti yokken $1s \rightarrow HH_1$ geçişine (Şekil 4.11’de kırmızı okla gösterilen bölge) karşılık gelen bölgede omuz görülmektedir. Bu durumda PL tepelerinin FWHM değerlerinde kendini göstermektedir. Büyütme sıcaklığıyla ters orantılı olacak şekilde FWHM değerleri değişmektedir. Düşük sıcaklıkta yapılan büyütmelelerdeki delta katkılama difüzyon daha az olduğundan safsızlık geçişleri büyütme sıcaklığı düştükçe belirginleşmektedir.

Tablo 4.6 Delta katkılama sıcaklığını belirlemek amacıyla oluşturulan 50 tekrarlı süperörgü örnek grubu için yapılan XRD ölçümlerinden elde edilen sayısal sonuçlar

Örnek Kodu	Periyot kalınlığı (nm)	S-FWHM (arcsec)	SL-FWHM (arcsec)	SL+1-FWHM (arcsec)
NB218	10,01 ± 0,01	8,7	30,1	40,5
NB219	9,98 ± 0,02	8,8	30,8	41,8
NB220	9,96 ± 0,04	8,8	30,0	41,2

Tablo 4.7 Delta katkılama sıcaklığını belirlemek amacıyla oluşturulan 50 tekrarlı süperörgü örnek grubu için yapılan düşük sıcaklık PL ölçümlerinden elde edilen sayısal sonuçlar

Örnek Kodu	$E_1 \rightarrow HH_1$ (eV)	Şiddet (k.b.)	FWHM (meV)
NB218	1,5963	144	13,3
NB219	1,5948	75	19,2
NB220	1,5941	44	22,9



Şekil 4.11 50 tekrarlı süperörgü büyütme sıcaklığı grubu için 532 nm dalgaboylu düşük şiddet lazer uyarımı altında 9 K sıcaklıkta yapılan PL ölçümlerinin normalize sonuçları

4.2.2. Çoklu kuantum kuyu örnekler üzerinden karakterizasyon

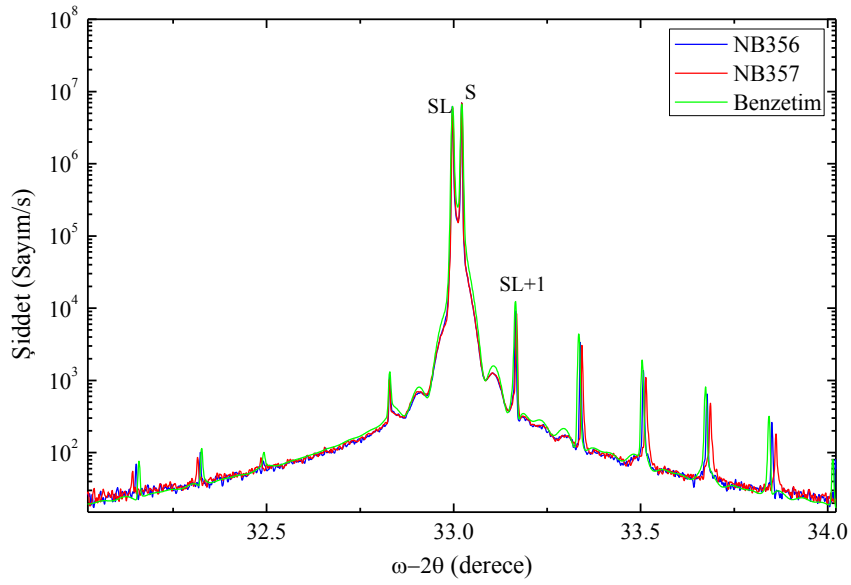
Süperörgü yapılar üzerinden yapılan büyütme sıcaklığının delta katkılamaya etkisinin araştırıldığı çalışmaya engel tabakasının çok daha geniş olduğu çoklu kuantum kuyu yapılar üzerinden de devam edilmiştir. MBE büyütme parametreleri Tablo 4.8’de verilen iki örnekten oluşan 50 tekrarlı çoklu kuantum kuyu örnek grubunda büyütme sıcaklığı haricindeki bütün parametreler aynı tutulmuştur. Kuantum kuyu merkezleri Si atomlarıyla $3,0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ mertebesinde delta katkılanan bu örnek grubunun engel bölgeleri $\text{Al}_{0,33}\text{Ga}_{0,67}\text{As}$ malzemesi ile oluşturulmuştur. Önceki süperörgü grubundan

farklı olarak büyütmenin yapılacağı düşük sıcaklık bölgesi için büyütme denemeleri yapılarak büyütme sıcaklığı 460 °C olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.8 Delta katkılama sıcaklığını belirlemek amacıyla oluşturulan 50 tekrarlı çoklu kuantum kuyu örnek grubu için MBE sisteminde kullanılan büyütme parametreleri

Örnek Kodu	δ -Katkı Miktarı (cm^{-2})	Kuyu Genişliği (nm)	Büyütme Sıcaklığı (°C)	Engel kalınlığı (nm)
NB356	Si: 3×10^{10}	5	540	30
NB357	Si: 3×10^{10}	5	460	30

Büyütülen örnek grubu için HRXRD ölçüm sisteminde GaAs (004) düzleminden yapılan w -2 θ ölçüm sonuçları ve bu sonuçlara yapılan benzetim işlemi sonuçları Şekil 4.12’de sunulmuştur. Bu ölçüm sonuçlarından elde edilen sayısal sonuçlar da Tablo 4.9’da verilmiştir. NB356 ve NB357 kod numaralı örnekleri için elde edilen periyot kalınlığı değerleri hemen hemen aynı çıkmıştır. Bu da beklendiği gibi kuyu genişlikleri ve engel genişlikleri arasında fark olmadığı anlamına gelmektedir. Ancak büyütmelelerde kullanılan GaAs altaşların (0 0 4) tepelerinin FWHM değerleri (Tablo 4.9’da S-FWHM ile gösterilen) arasında küçükte olsa bir fark olduğu görülmüştür. Kristal yapıdan kaynaklanan bu farklılık bağlantılı olarak çok tekrarlı kuantum kuyu yapısının tepesinin (Şekil 4.12’de SL ile gösterilen) FWHM değerinde ve pozitif bölgedeki birinci saçak (Şekil 4.12’de SL+1 ile gösterilen) tepesinin FWHM değerinde de kendini göstermektedir. Bu farkın altaştan geldiği göz önünde bulundurulduğunda örneklerin kristal kalitesi olarak aynı oldukları sonucuna ulaşılmaktadır.



Şekil 4.12 50 tekrarlı çoklu kuantum kuyu büyütme sıcaklığı grubu için GaAs (0 0 4) düzleminde yapılan XRD $w-2\theta$ ölçüm ve benzetim işlemi sonuçları

Tablo 4.9 Delta katkılama sıcaklığını belirlemek amacıyla oluşturulan 50 tekrarlı çoklu kuantum kuyu örnek grubu için yapılan XRD ölçümlerinden elde edilen sayısal sonuçlar

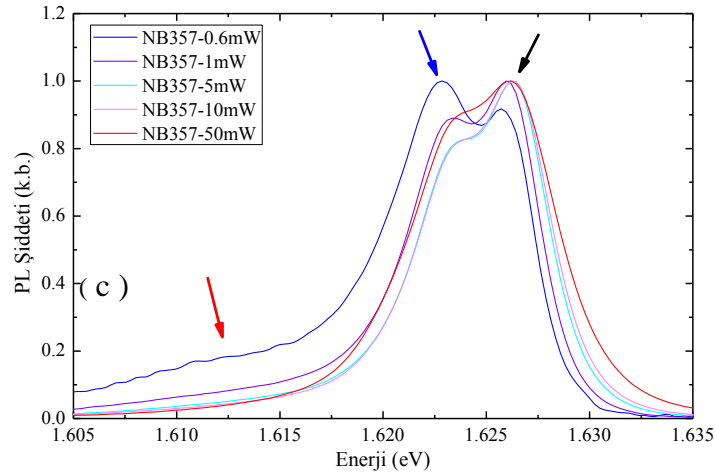
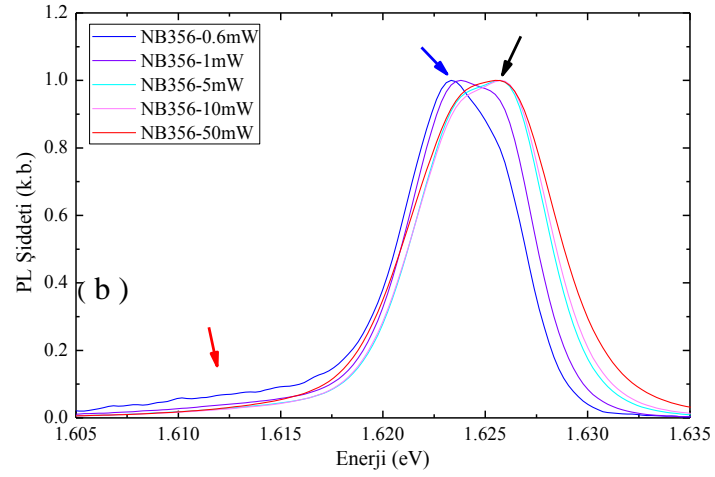
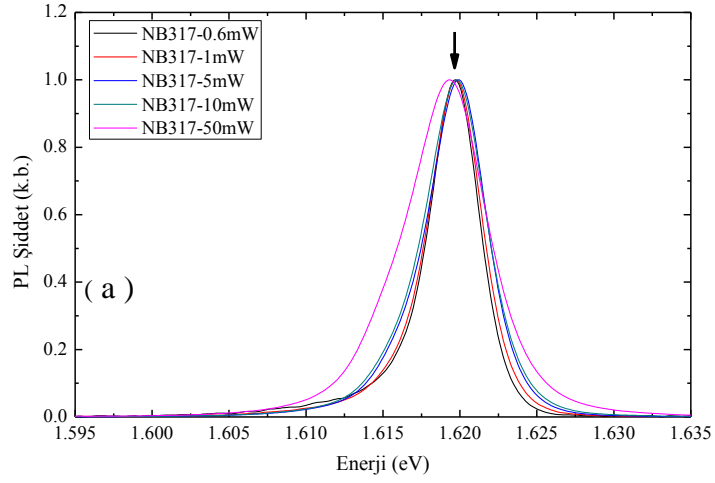
Örnek Kodu	Periyot Kalınlığı (nm)	S-FWHM (arcsec)	SL-FWHM (arcsec)	SL+1-FWHM (arcsec)
NB356	$30,9 \pm 0,4$	10,9	12,6	12,2
NB357	$30,5 \pm 0,4$	11,6	13,2	13,2

NB356 ve NB357 kod numaralı örnekler için 9 K sıcaklıkta 532nm dalgaboylu lazer uyarımı şiddeti NDF (Neutral density filter) yardımıyla değiştirilerek PL ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümlerde, NB356 kod numaralı örnekle aynı büyütme parametrelerine sahip ancak kuantum kuyusu daha dar olan NB317 (kuyu genişliği 5,1 nm) kod numaralı delta katkısız referans örneğiyle birlikte ölçülmüşlerdir. Şekil 4.13 (a)'da NB317 kod numaralı örneği için farklı lazer şiddeti uyarımı altında alınan PL ölçüm sonuçları sunulmuştur. 1,6198 eV merkezli tepe $E_1 \rightarrow HH_1$ geçişine (siyah okla gösterilen) karşılık gelmektedir ve ortalama FWHM genişliği 4,6 meV'tur. Lazer uyarım şiddetinin azaltılmasının ölçüm sonuçları üzerinde herhangi bir değişikliğe neden olmadığı bu örnek üzerinden karakterize edilmiştir. Şekil 4.13 (a)'da görüldüğü

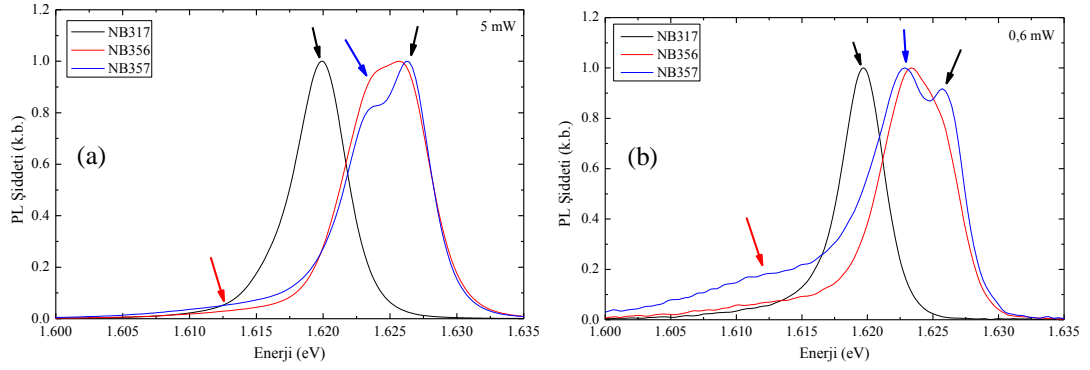
üzere yüksek lazer şiddetinin örneğin ısınmasına ve dolayısıyla tepe konumunun düşük enerji bölgesine kaymasına neden olduğu görülmektedir. Benzer şekilde NB356 ve NB357 kod numaralı örnekleri için de aynı ölçümler yapılmış ve sonuçlar sırasıyla Şekil 4.13 (b)'de ve Şekil 4.13 (c)'de sunulmuştur. NB356 ve NB357 kod numaralı örnekleri için tepelerden elde edilen FWHM değerleri sırasıyla 7,1 meV ve 7,3 meV'tur. Ancak NB356 ve NB357 kod numaralı örneklerde NB317 kod numaralı örnekten farklı olarak lazer uyarım şiddeti düştükçe $E_1 \rightarrow HH_1$ geçişlerine (siyah ok) karşılık gelen geçişler baskılanmakta ve safsızlık 1s ve 2p enerji seviyesinden HH_1 seviyesine ($1s \rightarrow HH_1$ (kırmızı ok) ve $2p_{\pm} \rightarrow HH_1$ (mavi ok)) olan geçişler belirginleşmektedir. Özellikle $2p_{\pm}$ bant benzeri Hidrojenik seviyelerden kaynaklanan geçişler ($2p_{\pm} \rightarrow HH_1$) düşük lazer uyarımı altında NB356 ve NB357 kod numaralı örneklerde kendini tepe olarak gösterirken $1s \rightarrow HH_1$ geçişlerinin karşılık geldiği düşük enerji bölgesinde ise omuz şeklinde gözlemlenmektedir. NB356 kod numaralı örneği için ana PL tepesi (siyah ok) baz alınarak yapılan hesaplamalar sonucunda 1s hidrojenik enerji seviyesi için bağlanma enerjisi -13,4 meV ve $2p_{\pm}$ bant benzeri hidrojenik enerji seviyesi için bağlanma enerjisi -2,4 meV olarak elde edilmiştir. NB357 kod numaralı örneği aynı koşullar için yapılan hesaplamalarda ise 1s hidrojenik enerji seviyesi için bağlanma enerjisi -13,5 meV ve $2p_{\pm}$ bant benzeri hidrojenik enerji seviyesi için bağlanma enerjisi -2,5 meV olarak elde edilmiştir. Bu durumda NB356 ve NB357 kod numaralı örnekleri için $1s \rightarrow HH_1$ (kırmızı ok) geçişinin gözlemlenmesi gereken enerji konumu sırasıyla 1,6100 eV ve 1,6122 eV'tur ve Şekil 4.13 (b) ve (c)'de görüldüğü gibi bu örnekler için 0,62 mW lazer uyarımında bu bölgelerde omuz gözlemlenmektedir. Ancak $2p_{\pm} \rightarrow HH_1$ geçişine (mavi ok) karşılık gelen 1,6210 eV ve 1,6233 eV bölgesinde ayrışma net olarak gözlemlenmekte ve PL ölçümlerinden $2p_{\pm}$ bant benzeri hidrojenik bağlanma enerjisi NB356 kod numaralı örneği için 2,5 meV ve NB356 kod numaralı örneği için 2,8 meV olarak belirlenmiştir. Sonuçlar Tablo 4.10'da diğerleriyle birlikte sunulmuştur. Kuramsal hesaplamalardan ve PL ölçüm sonuçlarının analizinden elde edilen değerler arasındaki farklar deneysel hata payı sınırları içindedir. Şekil 4.14'de NB317, NB356 ve NB357 kod numaralı örnekleri için alınan düşük sıcaklık PL ölçümleri aynı grafik üzerinde (a) 5 mW lazer uyarımı için ve (b) 0,62 mW lazer uyarımı için sunulmuştur. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de verilen PL ölçüm sonuçları normalize edilmiştir. NB356 ve NB357 kod numaralı örneklerinin aynı lazer uyarım şiddeti altındaki PL ölçüm sonuçlarında tepe şiddetleri arasında 1,8 kat vardır. NB357 kod numaralı örneğin PL

ölçüm sonuçlarında safsızlık seviyelerinden kaynaklanan etkiler daha belirgin olmasına karşın sinyal şiddetinde belirgin bir düşme vardır.

MBE sisteminde kullanılan büyütme sıcaklığının delta katkılama üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla üretilen süperörgü ve çoklu kuantum kuyu örnekler üzerinden PL ölçümleri ve analizler yapılmıştır. Elde edilen sayısal sonuçlar kuramsal hesaplamalarla kıyaslanarak teyit edilmiştir. Her iki örnek grubunda da düşük sıcaklıkta delta katkılanan örnekler için PL ölçümlerinde safsızlık enerji seviyelerinden gelen sinyallerin belirginleştiği görülmektedir. Ancak yine her iki örnek grubunda da bu örneklerin PL sinyallerinin çok düştüğü yani optik olarak yeterince aktif olmadıkları gözlemlenmektedir. Bu durumlar göz önünde bulundurularak 540 °C’de yapılan büyütmelemlerin daha tercih edilebilir olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.13 NB317, NB356 ve NB357 kod numaralı örnekleri için 9 K sıcaklıkta 532 nm dalgaboylu lazerin uyarım şiddetinin NDF (Neutral density filter) yardımıyla değiştirilerek yapılan fotoluminesans ölçüm sonuçlarının normalize edilmiş hali



Şekil 4.14 NB317, NB356 ve NB357 kod numaralı örnekleri için 9 K sıcaklıkta 532 nm dalgaboylu lazerin 5 mW (a) ve 0,6 mW (b) uyarım şiddeti altında yapılan fotoluminesans ölçüm sonuçlarının normalize edilmiş hali

Tablo 4.10 Delta katkılama sıcaklığını belirlemek amacıyla oluşturulan 50 tekrarlı çoklu kuantum kuyu örnek grubu için düşük sıcaklıkta 0,6 mW lazer uyarım şiddeti altında alınan PL ölçümlerinden elde edilen sayısal sonuçlar

Örnek Kodu	$E_1 \rightarrow HH_1$ (eV)	$E_1 - 2p_{\pm}$ (meV)	Şiddet (k.b.)	FWHM (meV)
NB356	1,6234	2,5	29	6,2
NB357	1,6257	2,8	16	7,9

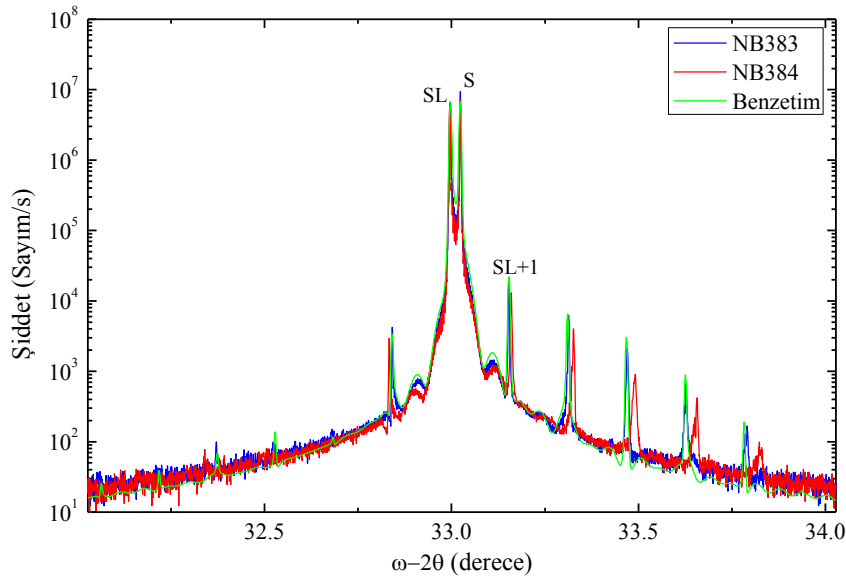
4.3. As₂ ve As₄ Akısının Delta Katkılamaya Etkisi

Moleküler demet epitaksi sisteminde büyütme için kritik olan bir diğer parametre de kullanılan Arsenik'in (As) moleküler yapısıdır (As₄ (tetramer) ve As₂ (dimer)). MBE sisteminde As efüzyon hücresinin uç kısmında yer alan bağ kırıcı (cracker) bölümünün sıcaklığı değiştirilerek As molekülleri değiştirilebilmektedir. Büyütme sıcaklığı kalibrasyonu yapıldıktan sonra büyütme parametreleri Tablo 4.11'de verilen NB383 ve NB384 kod numaralı örnekleri kullanılan As molekül yapısı hariç diğer parametreler aynı tutulmuştur. NB384 kod numaralı örneği için As hücresinin bağ kırıcı bölüm sıcaklığı düşük tutularak As₄ moleküllerinin büyütme işlemi sırasında kullanılması sağlanmıştır.

Tablo 4.11 *As molekül yapısının delta katkılamaaya etkisini belirlemek amacıyla oluşturulan 50 tekrarlı çoklu kuantum kuyu örnek grubu için MBE sisteminde kullanılan büyütme parametreleri*

Örnek Kodu	δ -Katki Miktarı (cm^{-2})	Kuyu Genişliği (nm)	Büyütme Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	As Molekülü	As Akısı (BEP) (Torr)
NB383	$\text{Si: } 3 \times 10^{10}$	6	540	As_2 Cracker 900°C	2×10^{-6}
NB384	$\text{Si: } 3 \times 10^{10}$	6	540	As_4 Cracker 625°C	2×10^{-6}

NB383 ve NB384 kod numaralı örnekleri için HRXRD sisteminde yapılan w - 2θ ölçüm sonuçları Şekil 4.15’de verilmiştir. Bu ölçüm ve yapılan benzetim işlemi sonuçlarından elde edilen sayısal sonuçlar Tablo 4.12’de verilmiştir. Ardışık büyütülen NB383 ve NB384 kod numaralı örneklerin periyot kalınlığı değerleri arasında 1,4 nm fark olduğu görülmüştür. MBE sisteminde büyüme hızı III grubu (Ga) akısına bağlı olduğundan V grubu (As) malzemedeki değişimin büyüme hızına etkisinin olması beklenmemektedir. Bu durumun olası sebeplerinden biri Ga hücresinin uç bölümündeki ısıtıcının kararsızlığı olarak değerlendirilmiştir. Her iki örneğin GaAs altaş (004) düzlem tepesinin (Şekil 4.15’de S ile gösterilen) FWHM değerleri aynıdır. Yine süperörgü tepesinin (Şekil 4.15’de SL ile gösterilen) FWHM değerlerinin birbirlerine çok yakın olduğu fakat pozitif bölgedeki süperörgü birinci saçak tepeleri (Şekil 4.15’de SL+1 ile gösterilen) arasında bir fark olduğu görülmüştür. Bu durumun olası nedeni As_4 moleküllerinin As_2 molekülleri kadar girişken olmaması ve bu grupta As için aynı BEP değerlerinin kullanılmış olması nedeniyle ara yüzlerde pürüzlülüğün artması olarak değerlendirilmiştir. Burada verilmemekle birlikte bu durum XRR ölçüm sonuçlarındaki arayüz pürüzlülük değerlerinde de gözlemlenmiştir.



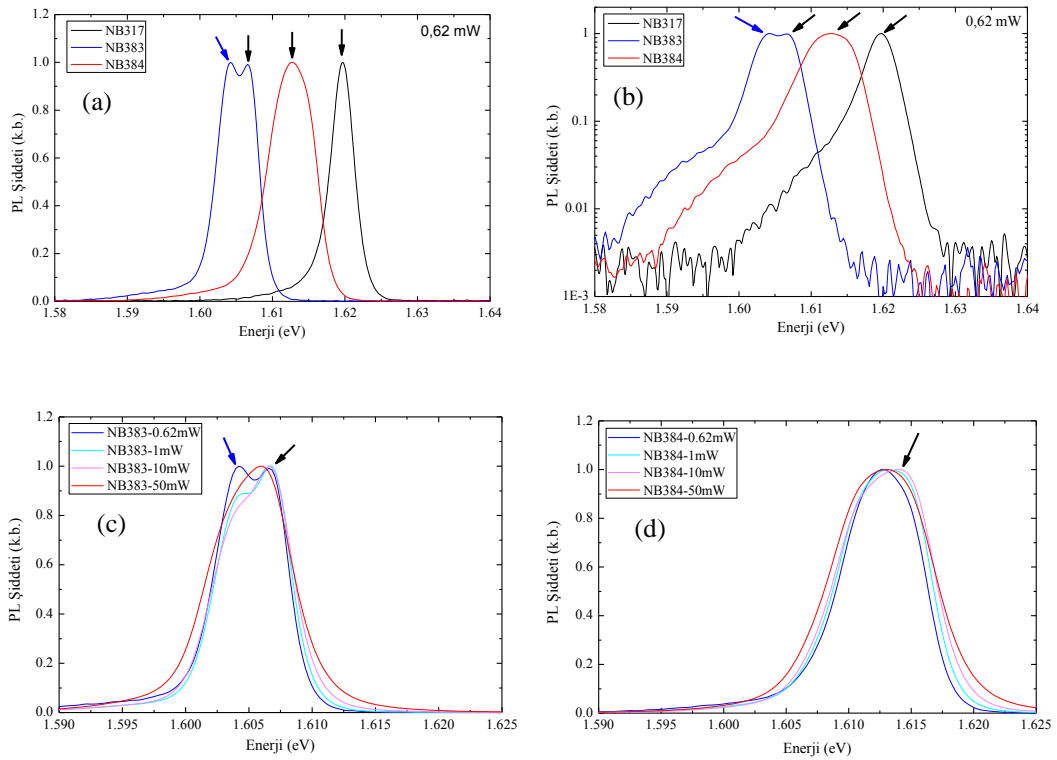
Şekil 4.15 NB383 ve NB384 kod numaralı 50 tekrarlı çoklu kuantum kuyu örnekleri için GaAs (0 0 4) düzleminde yapılan XRD $w-2\theta$ ölçüm ve benzetim işlemi sonuçları

Tablo 4.12 As molekül yapısının delta katkılama etkisini belirlemek amacıyla oluşturulan 50 tekrarlı çoklu kuantum kuyu örnek grubu için XRD ölçüm sonuçlarından elde edilen sayısal sonuçlar

Örnek Kodu	Periyot Kalınlığı (nm)	S-FWHM (arcsec)	SL-FWHM (arcsec)	SL+1-FWHM (arcsec)
NB383	$33,3 \pm 0,6$	9,2	13,2	11,6
NB384	$31,9 \pm 0,3$	9,5	13,4	13,1

Bu örnek grubu için yapılan düşük sıcaklık PL ölçüm sonuçları Şekil 4.16'da verilmiştir. Yine NB317 kod numaralı katkısız referans örneği kıyaslama yapmak amacıyla kullanılmıştır. Şekil 4.16 (a) ve (b)'de 0,62 mW lazer uyarımı altında 9 K sıcaklıkta yapılan PL ölçümleri kıyaslama yapmak amacıyla bir arada verilmiştir. Şekil 4.16 (c)'de NB383 kod numaralı ve (d)'de NB384 kod numaralı örnek için farklı lazer uyarım şiddeti altında yapılan düşük sıcaklık PL ölçüm sonuçları sunulmuştur. NB383 kod numaralı örnekte lazer uyarım şiddeti azaldıkça hidrojenik enerji seviyelerinden kaynaklanan geçişler baskınlık kazanırken NB384 kod numaralı örnekteyse bu seviyelerden kaynaklanan geçişler ayırt edilememektedir. NB383 kod numaralı örnek için $2p_{\pm} \rightarrow HH_1$ geçişine (mavi ok ile gösterilen) karşılık gelen tepe ile $E_1 \rightarrow HH_1$ geçişine

(siyah ok ile gösterilen) karşılık gelen ana tepe arasındaki ayırım yani $2p_{\pm}$ bağlanma enerjisi 2,4 meV olarak belirlenmiştir. NB383 kod numaralı örnek için yapılan hesaplamalarda $1s$ bağlanma enerjisi -13,0 meV ve $2p_{\pm}$ bağlanma enerjisi -2,4 meV olarak hesaplanmıştır ki bu değer deneysel sonuçlarla son derece uyumludur. NB384 kod numaralı örneği için yapılan hesaplamalarda $1s$ bağlanma enerjisi -13,2 meV ve $2p_{\pm}$ bağlanma enerjisi -2,4 meV olarak belirlenmesine rağmen PL ölçümlerinden net sayısal değerler elde edilememiştir.



Şekil 4.16 NB317, NB356 ve NB357 kod numaralı örnekleri için 9 K sıcaklıkta 532 nm dalgaboylu lazerin 0,6 mW lazer uyarımı için (a) normal ve (b) logaritmik ekseninde verilen normalize edilmiş PL ölçüm sonuçları. NB383 kod numaralı (a) ve NB384 kod numaralı (b) örnekleri için farklı lazer uyarım şiddeti altında yapılan normalize edilmiş fotoluminesans ölçüm sonuçları

Tablo 4.13 *As moleköl yapısının delta katkılama üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla oluşturulan 50 tekrarlı çoklu kuantum kuyu örnek grubu için düşük sıcaklıkta 0,2 mW lazer uyarım şiddeti altında alınan PL ölçümlerinden elde edilen sayısal sonuçlar*

Örnek Kodu	$E_{1 \rightarrow HH_1}$ (eV)	$E_{1-2p_{\pm}}$ (meV)
NB383	1,6066	2,4
NB384	1,6127	-

MBE büyütme işlemi sırasında kullanılan As malzemesinin moleköl yapısının delta katkılamaya etkisinin araştırıldığı bu örneklerde As_2 ile kıyaslandığında As_4 'ün hiçbir avantaj yaratmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

4.4. Süperörgü ve Çoklu Kuantum Kuyu Yapılarda Delta Katkılama Karşılaştırılması

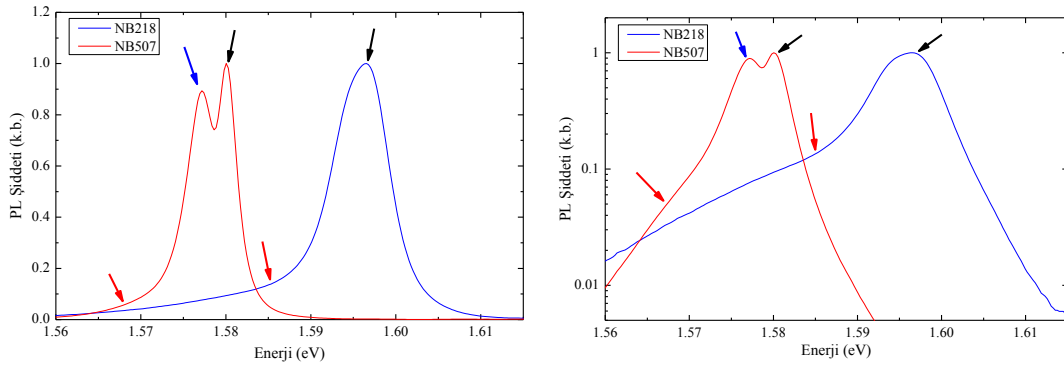
Süperörgü yapılar ile çoklu kuantum kuyu yapılar arasındaki farklar ve safsızlık atomlarının Hidrojenik enerji seviyelerine etkisi Bölüm 2.2.2'de anlatılmıştı. Aynı koşullarda ve kuyu genişliklerinde büyütölen süperörgü ve kuantum kuyu yapılarıdaki safsızlık atomlarının bağlanma enerjilerinin deneysel olarak kıyaslanabilmesi için iki örnek büyütmesi yapılmıştır. Si delta katkı NB218 kod numaralı süperörgü örneğin parametreleriyle büyütölen NB507 kod numaralı çoklu kuantum kuyu örneği için yapılan PL ölçüm sonuçları analiz edilmiştir. Be katkı atomu için ise iki örnekten oluşan yeni bir örnek grubu hazırlanmıştır. Ardışık olarak büyütölen NB569 kod numaralı süperörgü ve NB570 kod numaralı çoklu kuantum kuyu örneklerin engel genişlikleri dışındaki bütün büyütme koşulları aynı tutulmuştur. Bu dört örnek için MBE sisteminde kullanılan büyütme parametreleri Tablo 4.14'te verilmiştir.

NB218 ve NB507 kod numaralı örnekleri için 9 K sıcaklıkta 10 mW lazer uyarımı altında yapılan PL ölçümlerinin sonuçları aynı grafikte Şekil 4.17'de normalize edilerek sunulmuştur. Bu grafikte siyah renkli oklar $E_{1 \rightarrow HH_1}$, mavi renkli oklar $2p_{\pm} \rightarrow HH_1$ ve kırmızı renkli oklar $1s \rightarrow HH_1$ geçişlerine karşılık gelen tepe ve omuzları göstermektedir. NB218 kod numaralı süperörgü örnek için ana PL tepesi (siyah ok ile gösterilen) temel alınarak yapılan hesaplamalar sonucunda $1s$ bağlanma enerjisi -12,8 meV ve $2p_{\pm}$ bağlanma enerjisi -2,4 meV olarak elde edilmiştir. Ancak PL ölçüm sonuçlarından

ayırışma olmadığı için net bir değer elde edilememiştir. NB507 kod numaralı çoklu kuantum kuyu örneğinin ana PL tepesi baz alınarak yapılan hesaplamada 1s bağlanma enerjisi -12,3 meV ve 2p bağlanma enerjisi -2,4 meV olarak hesaplanmıştır ve bu değerler $2p_{\pm}$ bağlanma enerjisi için PL ölçümlerinden elde edilen 2,8 meV değeriyle uyumludur. NB218 ve NB507 kod numaralı örnekleri için PL ölçümlerinden elde edilen sayısal sonuçlar Tablo 4.15’de verilmiştir.

Tablo 4.14 Süperörgü ve çoklu kuantum kuyu örnek grubu için MBE sisteminde kullanılan büyütme parametreleri

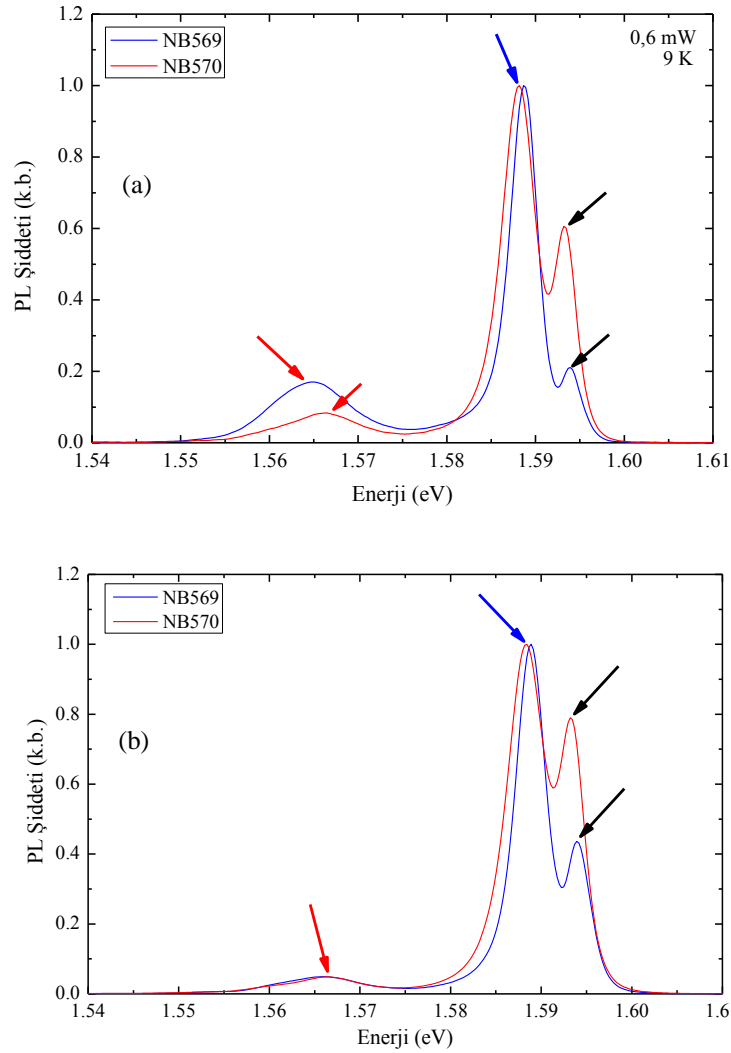
Örnek Kodu	Büyütme Sıcaklığı (°C)	δ -Katki (cm^{-2})	Kuyu Genişliği (nm)	Engel Genişliği (nm)
NB218	540	Si: $2,0 \times 10^{10}$	6	5
NB507	540	Si: $3,0 \times 10^{10}$	7	25
NB569	540	Be: $3,0 \times 10^{10}$	6,2	5
NB570	540	Be: $3,0 \times 10^{10}$	6,2	25



Şekil 4.17 NB218 kod numaralı süperörgü ve NB507 kod numaralı çoklu kuantum kuyulu Si delta katkılı örnekler için 9 K sıcaklıkta 10 mW lazer uyarım şiddeti altında alınan PL ölçüm sonuçlarının normalize grafiği

Tablo 4.15 Delta katkılama sıcaklığını belirlemek amacıyla oluşturulan Si delta katkılı 50 tekrarlı çoklu kuantum kuyu örnek grubu için düşük sıcaklıkta 10 mW lazer uyarım şiddeti altında alınan PL ölçümlerinden elde edilen sayısal sonuçlar

Örnek Kodu	$E_1 \rightarrow HH_1$ (eV)	$E_1 - 2p_{\pm}$ (meV)	Şiddet (k.b.)	FWHM (meV)
NB218	1,5965	-	77	7,9
NB507	1,5800	2,8	30	6,4



Şekil 4.18 NB569 kod numaralı süperörgü ve NB507 kod numaralı çoklu kuantum kuyulu Be delta katkılı örnekler için 9 K sıcaklıkta (a) 0,6 mW ve (b) 10 mW lazer uyarım şiddeti altında alınan PL ölçüm sonuçlarının normalize grafiği

Be delta katkılı NB569 kod numaralı süperörgü ve NB570 kod numaralı çoklu kuantum kuyu örnek grubu için yapılan düşük sıcaklık PL ölçümlerinin sonuçları normalize edilerek Şekil 4.18’de sunulmuştur. 0,62 mW lazer uyarım şiddeti altında alınan PL ölçümlerinden elde edilen sayısal sonuçlar Tablo 4.16’da verilmiştir. NB569 ve NB570 kod numaralı örnekleri için Hidrojenik enerji seviyelerinin hemen hemen aynı olduğu ve aralarındaki küçük farklılığın deneysel hata payı içinde yer aldığı sonucuna ulaşılmıştır. Süperörgü yapıda safsızlık seviyelerinin bant oluşturması nedeniyle çoklu kuantum kuyu yapıya göre bu seviyelerin PL sinyallerinin daha baskın olduğu görülmektedir.

Tablo 4.16 *Delta katkılama sıcaklığını belirlemek amacıyla oluşturulan Be delta katkılı 50 tekrarlı çoklu kuantum kuyu örnek grubu için düşük sıcaklıkta 0,2 mW lazer uyarım şiddeti altında alınan PL ölçümlerinden elde edilen sayısal sonuçlar*

Örnek Kodu	$E_{1 \rightarrow HH_1}$ (eV)	E_{1-1s} (meV)	$E_{1-2p_{\pm}}$ (meV)	Şiddet (k.b.)
NB569	1,5939	28,8	5,2	7
NB570	1,5933	27,0	5,1	10

5. KUANTUM KUYU İÇİNDEKİ SAFSIZLIK ATOMLARININ OPTO-ELEKTRONİK KARAKTERİZASYONLARI

Moleküler demet epitaksi sisteminde kristal büyüme ve özellikle delta katkılama için kullanılacak parametrelerin belirlenmesi süreci bir önceki bölümde detaylı olarak anlatılmıştır. Çalışmanın bu kısmında, belirlenen MBE temel büyüme parametreleri kullanılarak n-tipi (Silisyum ve Telür) ve p-tipi (Berilyum) katkılanan çoklu kuantum kuyu ve asimetrik tınlaşım tünelleme diyot örnek grupları üzerinden delta katkılanan safsızlık atomlarının Hidrojenik enerji seviyeleri belirlenmiştir. Bölüm 2.2 ve alt başlıklarında safsızlık atomlarının tanımlanan temel özellikleri (bağlanma enerjilerinin kuyu genişliğine, katkı atomuna ve kuantum kuyu içindeki konumlarına bağımlılığı) bu bölümde deneysel olarak gösterilmiştir. Büyütülen çoklu kuantum kuyu örneklerin karakterizasyonları temel olarak düşük sıcaklık PL ölçüm sonuçları üzerinden yapılmıştır. Tınlaşım tünelleme diyot örneklerde ise karanlık akım (I-V) ve elektrofotoluminesans ölçüm yöntemleri yardımıyla karakterizasyonlar yapılmıştır.

5.1. Delta Katkılı Çoklu Kuantum Kuyu Yapılar için Yapılan Fotoluminesans Karakterizasyonları

Çoklu kuantum kuyu örnekleri için MBE sisteminde kullanılan temel büyüme parametreleri sabit tutularak sadece safsızlık atomlarının bağlanma enerjilerini etkileyecek kuyu genişliği, katkı türü ve katkı atomlarının kuantum kuyu içindeki konumları gibi parametreler değiştirilerek oluşturulan grup örneklerin PL ölçüm sonuçları kıyaslamalı olarak alt başlıklar altında sunulmuştur.

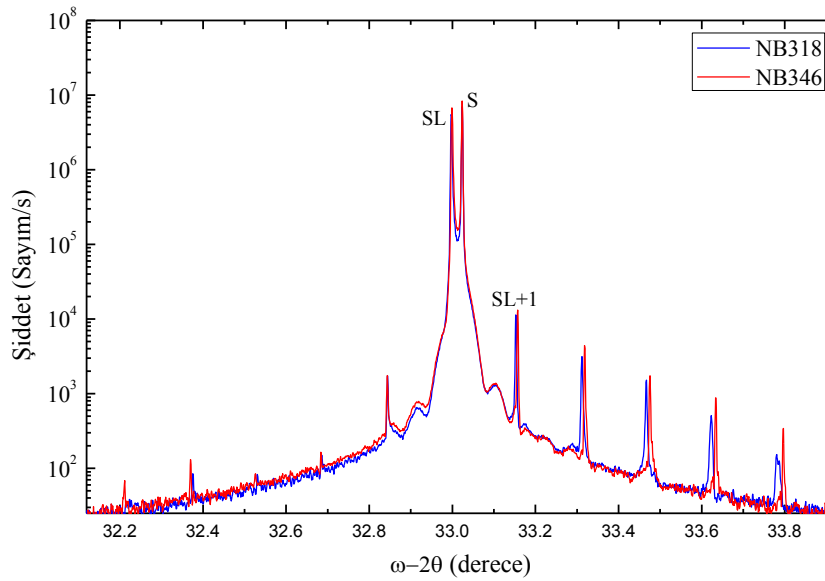
5.1.1. Delta katkılama süresi ve katkı efüzyon hücre sıcaklığının etkisi

MBE sisteminde delta katkılama işleminde katkı konsantrasyonu Bölüm 3.1.2’de anlatıldığı şekilde katkı efüzyon hücre sıcaklığının (birim zamanda alttaş yüzeyine gönderilen atom miktarını belirleyen parametre) ve bekleme süresinin fonksiyonudur. Bu nedenle, efüzyon hücre sıcaklığı ve Si delta katkı süresi değiştirilerek aynı konsantrasyonda iki boyutlu katkılama yapmak mümkündür. Büyütme parametreleri Tablo 5.1’de verilen NB318 ve NB346 kod numaralı örnekleri için Si efüzyon hücre sıcaklıkları ve delta katkılama süreleri dışındaki bütün MBE büyüme parametreleri

aynı tutulmuştur. NB318 kod numaralı örneği için yüksek Si efüzyon hücre sıcaklığı ve kısa delta katkılama süresi kullanılırken NB346 kod numaralı örneği için düşük Si efüzyon hücre sıcaklığı ve uzun delta katkılama süresi kullanılarak her ikisi için kuantum kuyu merkezlerinde $3,0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ katkı konsantrasyonu elde edilmiştir. Ancak MBE büyütme koşullarındaki küçük değişimler nedeniyle iki örneğin periyot kalınlığı değerleri arasında fark oluşmuştur. Bu durum NB318 ve NB346 kod numaralı örnekleri için Şekil 5.1’de sunulan HRXRD $w-2\theta$ ölçüm sonuçlarında görülebilmektedir. Bu ölçümlerden NB318 kod numaralı örneği için periyot kalınlığı değeri $33,6 \pm 0,4 \text{ nm}$ elde edilirken NB346 kod numaralı örneği için periyot kalınlığı değeri $33,1 \pm 0,5 \text{ nm}$ olarak edilmiştir.

Tablo 5.1 NB317, NB318 ve NB346 kod numaralı örneklerinin MBE büyütme parametreleri

Örnek Kodu	δ -Katkı Miktarı (cm^{-2})	δ -Katkı Süresi (s)	Kuyu Genişliği (nm)	Si Hücre sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
NB317	-	0	5	-
NB318	Si: $3,0 \times 10^{10}$	0,74	5	1095
NB346	Si: $3,0 \times 10^{10}$	9,40	5	1015

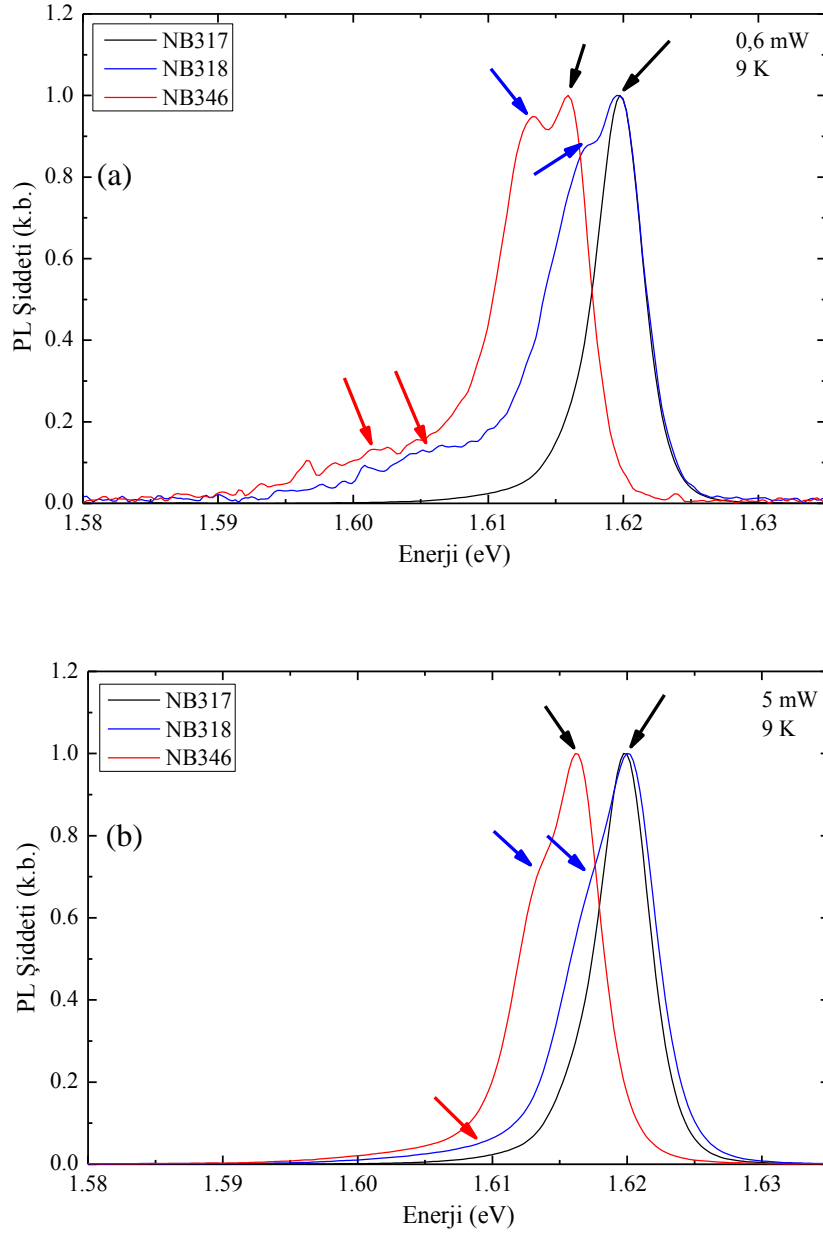


Şekil 5.1 NB318 ve NB346 kod numaralı örnekleri için GaAs (0 0 4) düzleminde yapılan HRXRD $w-2\theta$ ölçüm sonuçları

NB317, NB318 ve NB346 kod numaralı örnekleri için 9 K sıcaklıkta 0,6 mW ve 5 mW lazer uyarım şiddeti altında yapılan PL ölçüm sonuçları Şekil 5.2’de sunulmuştur. PL ölçüm sonuçlarından elde edilen sayısal sonuçlar Tablo 5.2’de verilmiştir. XRD ölçümlerinden elde edilen bilgilerle birlikte 0,6 mW lazer uyarımı altında alınan düşük sıcaklık PL ölçümlerinden örnekler için belirlenen $E_1 \rightarrow HH_1$ geçişine (Şekil 5.2’de siyah okla gösterilen tepe) karşılık gelen ana tepelerin enerji değerleri kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamalar sonucunda NB318 kod numaralı örneği için 1s bağlanma enerjisi -13,3 meV ve $2p_{\pm}$ bağlanma enerjisi -2,4 meV olarak hesaplanmıştır. NB346 kod numaralı örneği için yapılan hesaplamalarda da 1s bağlanma enerjisi -13,2 meV ve $2p_{\pm}$ bağlanma enerjisi -2,4 meV olarak belirlenmiştir. NB317 kod numaralı delta katkısız referans örneği için beklendiği gibi sadece $E_1 \rightarrow HH_1$ geçişi gözlemlenmektedir ve bu tepenin FWHM değeri 4,1 meV olarak belirlenmiştir. Delta katkılı NB318 ve NB346 kod numaralı örneklerinde ise $1s \rightarrow HH_1$ (Şekil 5.2’de kırmızı okla gösterilen omuz) ve $2p_{\pm} \rightarrow HH_1$ (Şekil 5.2’de mavi okla gösterilen tepe) geçişlerinden kaynaklı olarak FWHM değerleri sırasıyla 7,7 meV ve 7,3 meV olarak elde edilmiştir. NB318 kod numaralı örneği için PL ölçümlerinde $E_1 \rightarrow HH_1$ ve $2p_{\pm} \rightarrow HH_1$ tepeleri tam ayrışmadığından $2p_{\pm}$ bağlanma enerjisi yaklaşık olarak 2,2 meV olarak belirlenmiştir; bu değer, hesaplamalardan elde edilen 2,4 meV değeriyle uyumludur. NB346 kod numaralı örneği için $2p_{\pm}$ bağlanma enerjisi yaklaşık olarak 2,6 meV olarak belirlenmiştir. Hesaplamalardan elde edilen $2p_{\pm}$ bağlanma enerjileri ile PL ölçüm sonuçlarından çıkarılan değerler arasındaki fark ($\sim 0,2$ meV) deneysel hata payı sınırlarının içinde kalmaktadır. Her iki delta katkılı örnek için $1s \rightarrow HH_1$ geçişinin görülmesi beklenen düşük enerji bölgesinde net bir tepe tanımlanamamakla birlikte NB317 kod numaralı referans örneğiyle kıyaslandığında omuzlar (kırmızı oklar ile gösterilen bölgeler) gözlemlenmektedir.

Tablo 5.2 NB318 ve NB346 kod numaralı 50 tekrarlı çoklu kuantum kuyu örnekleri için düşük sıcaklıkta 0,6 mW lazer uyarım şiddeti altında alınan PL ölçümlerinden elde edilen sayısal sonuçlar

Örnek Kodu	$E_1 \rightarrow HH_1$ (eV)	$E_1 - 2p_{\pm}$ (meV)	FWHM (meV)
NB317	1,6197	-	4,1
NB318	1,6196	$\sim 2,3$	7,7
NB346	1,6159	2,6	7,3



Şekil 5.2 NB318 ve NB346 kod numaralı örnekleri için 9 K sıcaklıkta (a) 0,6 mW ve (b) 5 mW lazer uyarım şiddeti altında yapılan PL ölçüm sonuçları

İki boyutlu katkı konsantrasyonları aynı ancak delta katkılama süreleri farklı olan NB318 ve NB346 kod numaralı örnekleri için yapılan PL ölçümleri kıyaslandığında $E_1 \rightarrow HH_1$ (siyah oklar) ve $2p_{\pm} \rightarrow HH_1$ (mavi oklar) geçişlerine karşılık gelen tepelerin ayrımı NB346 kod numaralı örneğinde daha belirgindir. Ancak MBE sisteminde arkaplan katkı (background doping) seviyesi düşük olsa da delta katkılama esnasında As akısı altında büyütme durdurulduğundan bekleme süresinin artması istenmeyen safsızlık

atomlarının bu gölgedeki konsantrasyonunu da arttıracaktır. PL ölçüm sonuçlarından süreyi uzun tutmanın safsızlık seviyelerinin belirginleşmesi gibi küçük bir avantaj sağladığı gözlemlenmiştir. Ancak delta katkılama sürenin artmasının dezavantaja neden olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

5.1.2. Katkı atomuna bağlı olarak bağlanma enerjisi değişimi

Safsızlık atomlarının cinsine bağlı olarak bağlanma enerjilerinin de değiştiği bilgisine Bölüm 2.2.4'te değinilmiştir. PL ölçümlerinde $1s$ ve $2p_{\pm}$ seviyelerinden HH_1 seviyesine geçişlere karşılık gelen tepelerinin konumları yani safsızlık atomlarının bağlanma enerjileri, yapı içindeki safsızlık atomuna bağlı olarak değişecektir. Büyütme parametreleri Tablo 5.3'te verilen biri katkısız referans örneği olmak üzere sekiz örnekten oluşan grup örneklerin $Al_{0,33}Ga_{0,67}As$ engel tabakasının genişliği 25 nm 'dir. Si ve Be katkı atomları için birer tane 150 tekrar çoklu kuantum kuyu örnek büyütülmüştür.

Tablo 5.3 Katkısız referans, Si, Be ve Te delta katkılı çoklu kuantum kuyu örneklerinin MBE büyütme parametreleri

Örnek Kodu	δ -Katkı Miktarı (cm^{-2})	Kuyu Genişliği (nm)	δ -Katkı Konumu	Tekrar
NB511	Be: 3×10^{10}	7,2	Merkez	50
NB505	Be: 3×10^{10}	7,2	Kenar	50
NB570	Be: 3×10^{10}	6,2	Merkez	150
NB506	-	7,2	-	50
NB507	Si: 3×10^{10}	7,2	Merkez	50
NB508	Si: 3×10^{10}	7,2	Kenar	50
NB559	Si: 3×10^{10}	7,2	Merkez	150
NB509	Te: 3×10^{10}	7,2	Merkez	50

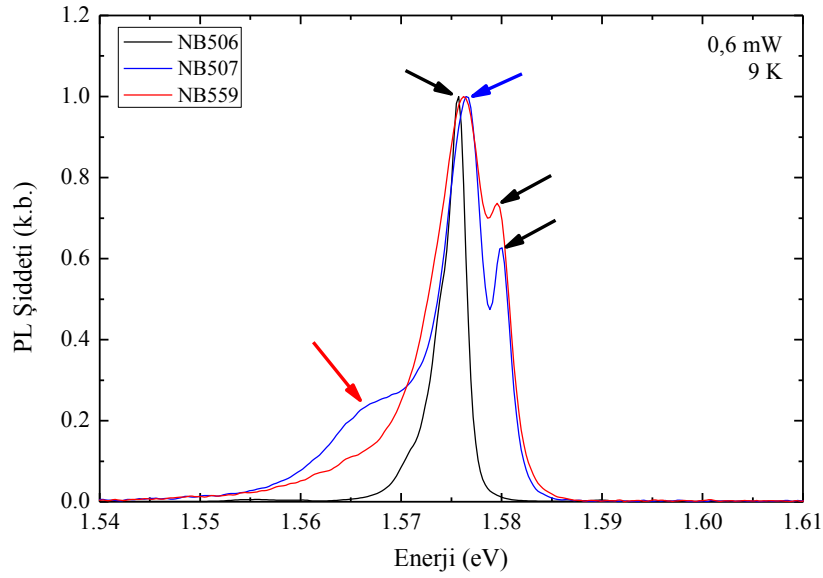
Büyütme detayları Tablo 5.3'te verilen NB507 ve NB559 kod numaralı Si delta katkılı çoklu kuantum kuyu örnekleri için yapılan düşük sıcaklık düşük lazer uyarımlı PL ölçüm sonuçları Şekil 5.3'te sunulmuştur. $0,6\text{ mW}$ lazer uyarım şiddeti altında alınan PL ölçüm sonuçlarından elde edilen sayısal sonuçlar Tablo 5.4'de verilmiştir. NB507 kod numaralı Si delta katkılı çoklu kuantum kuyu örneği için $1s$ bağlanma

enerjisi değeri $\sim 12,7$ meV (Şekil 5.3'te kırmızı okla gösterilmiştir) ve $2p_{\pm}$ (Şekil 5.3'te mavi okla gösterilmiştir) bağlanma enerjisi değeri 3,3 meV olarak bulunmuştur. NB559 kod numaralı örneği 150 tekrarlı kuantum kuyu yapıdan oluşmaktadır ve $2p_{\pm}$ bağlanma enerjisi değeri 3,3 meV olarak belirlenmiştir. Ancak 1s bağlanma enerjisinin karşılık geldiği bölgede (Şekil 5.3'te kırmızı okla gösterilen bölge) bir omuz görülmekle birlikte net sayısal bir sonuç elde edilememiştir. Elde edilen sonuçlar, hem birbirleriyle hem de teorik öngörüler ile uyumludur.

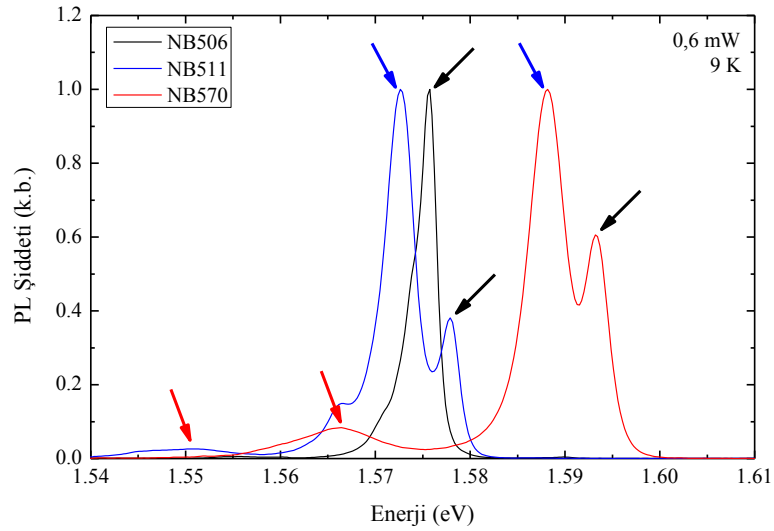
Tablo 5.4 *Katkısız referans, Si, Be ve Te delta katkılı çoklu kuantum kuyu örnekleri için düşük sıcaklıkta 0,6 mW lazer uyarım şiddeti altında alınan PL ölçümlerinden elde edilen sayısal sonuçlar*

Örnek Kodu	$E_{1 \rightarrow HH_1}$ (eV)	E_{1-1s} (meV)	$E_{1-2p_{\pm}}$ (meV)
NB511	1,5779	27,1	5,2
NB570	1,5933	27,0	5,2
NB506	1,5757	-	-
NB507	1,5799	12,7	3,3
NB559	1,5796	-	3,3
NB509	1,5774	18,4	6,4

Be delta katkılı çoklu kuantum kuyu yapıları NB511 ve NB570 kod numaralı örnekleri için büyütme parametreleri Tablo 5.3'te gösterilmiştir. Bu örnek grubu için düşük sıcaklıkta ve 0,6 mW lazer uyarımı altında yapılan PL ölçüm sonuçları Şekil 5.4'te ve PL ölçüm sonuçlarından elde edilen sayısal sonuçları da Tablo 5.4'de sunulmuştur. NB511 kod numaralı örneği 50 kuantum kuyudan oluşurken NB570 kod numaralı örneği 150 kuantum kuyudan oluşmaktadır. Her iki örnek için de 1s bağlanma enerjisi ~ 27 meV, $2p_{\pm}$ bağlanma enerjisi ise 5,2 meV olarak bulunmuştur. NB570 kod numaralı örneğinin kuantum kuyu genişliği NB511 kod numaralı örneğe göre daha dar olduğundan safsızlık atomlarının bağlanma enerjilerinin daha yüksek olması gerekmektedir. Ancak PL ölçüm sistemindeki hassasiyet mertebesi ve tepe tanımlama işlemlerinden kaynaklanan hata payları göz önünde bulundurulduğunda bu farkı görmek mümkün olmamıştır.



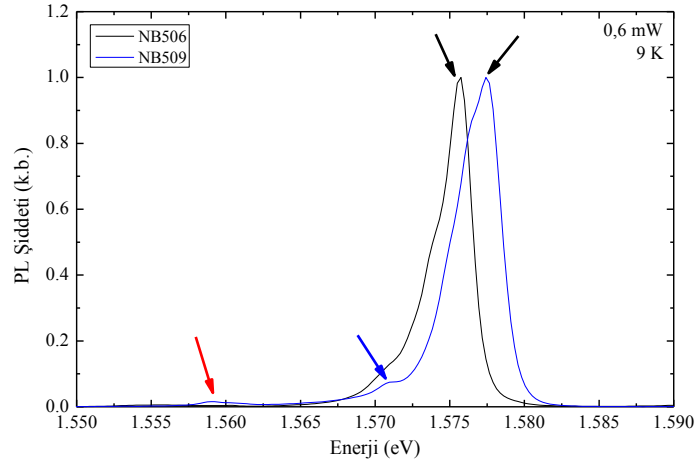
Şekil 5.3 NB506 kod numaralı katkısız referans örneği ile birlikte Si delta katkılı çoklu kuantum kuyu yapıların 9 K sıcaklıkta 0,6 mW lazer şiddeti altında alınan PL ölçümlerinin normalize edilmiş grafikleri



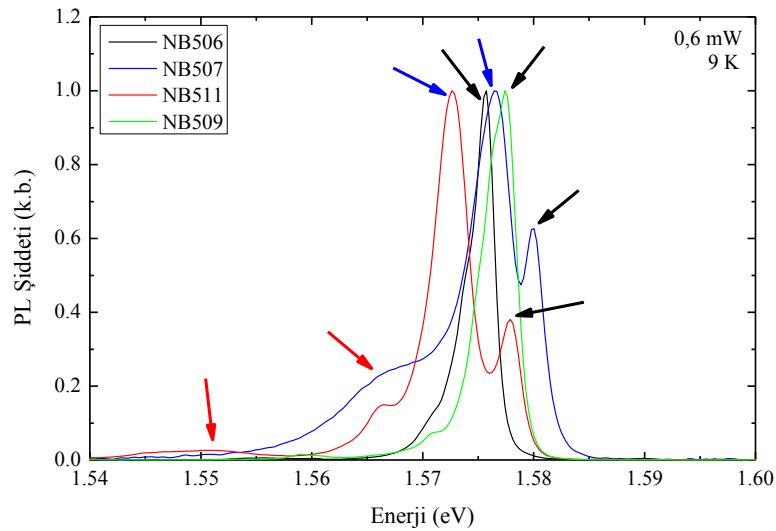
Şekil 5.4 NB506 kod numaralı katkısız referans örneği ile birlikte Be delta katkılı çoklu kuantum kuyu yapıların 9 K sıcaklıkta 0,6 mW lazer şiddeti altında alınan PL ölçümlerinin normalize edilmiş grafikleri

Kuantum kuyu merkezi Te katkılanan NB509 kod numaralı örneğinin düşük sıcaklık ve düşük lazer şiddeti altında alınan PL ölçüm sonuçları ise Şekil 5.5'te verilmiştir. NB509 için yapılan ölçüm sonuçlarından E_1-1s enerji farkı $\sim 18,4$ meV ve

E_1-2p enerji farkı 6,4 meV olarak bulunmuştur. Sonuçlar, Si atomlarına kıyaslandığında bağlanma enerjisi daha yüksek olan Te safsızlık atomları için beklenen değerlerle uyumludur.



Şekil 5.5 NB506 ve NB509 Te delta katkılı çoklu kuantum kuyu yapıların 9 K sıcaklıkta 0,6 mW lazer şiddeti altında alınan PL ölçümlerinin normalize edilmiş grafikleri



Şekil 5.6 Katkısız referans, Si, Be, ve Te delta katkılı çoklu kuantum kuyu yapıların 9 K sıcaklıkta 0,6 mW lazer şiddeti altında alınan PL ölçümlerinin normalize edilmiş grafikleri

Farklı katkı atomları kullanılarak kuantum kuyu merkezleri delta katkılanan çoklu kuantum kuyu örnekleri için 0,6 mW lazer şiddeti altında yapılan düşük sıcaklık PL ölçüm sonuçları Şekil 5.6'da bir arada verilmiştir. $1s \rightarrow HH_1$ (kırmızı oklar) ve $2p \rightarrow HH_1$ (mavi oklar) geçişlerine karşılık gelen tepe ve omuzların konumlarının $E_1 \rightarrow HH_1$ (siyah oklar) geçişine karşılık gelen tepe ile arasındaki fark safsızlık atomuna bağlı olarak değiştiği bu grafikten görülmektedir.

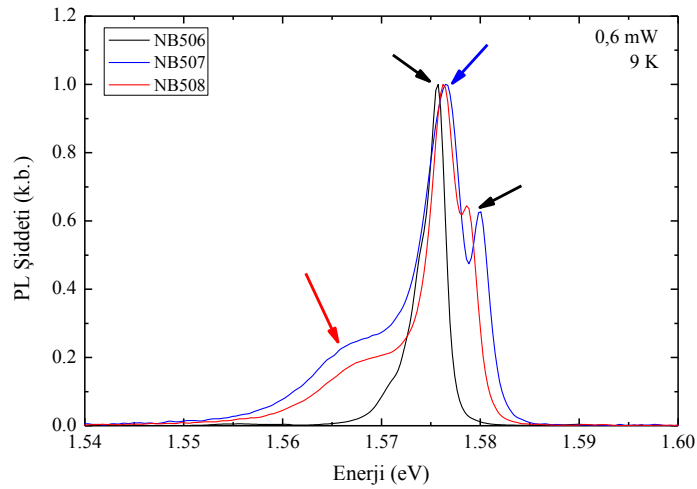
5.1.3. Katkı atomunun kuantum kuyu içindeki konumunun bağlanma enerjisine etkisi

Tamamen aynı özelliklere sahip çoklu kuantum kuyu örneklerde delta katkılamanın kuyudaki konumu değiştiğinde bağlanma enerjilerinin de değişmesi gerekmektedir. Kuantum kuyunun genişliği ve engel yüksekliği safsızlık atomlarının bağlanma enerjisinde değişime neden olurken kuantum kuyu enerji seviyelerinde de değişime neden olur. Ancak safsızlık atomlarının kuantum kuyu içindeki konumlarının değişimi kuantum kuyunun enerji seviyelerine etki etmezken safsızlık atomlarının bağlanma enerjilerini değiştirir. Bu farkı görebilmek amacıyla büyütme parametreleri Tablo 5.3'te verilen örnek grubunun içinde Si ve Be safsızlık atomları için biri kuantum kuyunun merkezinde ($z = 0,0$) ve biri kuantum kuyunun kenarına doğru ($z = +0,3$) delta katkılanan çoklu kuantum kuyu örnekler büyütülmüştür. Burada kuantum kuyuların engel ile birleştiği arayüz bölgeleri $z = \pm 0,5$ olarak tanımlanmaktadır.

Tablo 5.5 Delta katkı konumu farkı çoklu kuantum kuyu grup örnekleri için düşük sıcaklıkta 0,6 mW lazer uyarım şiddeti altında alınan PL ölçümlerinden elde edilen sayısal sonuçlar

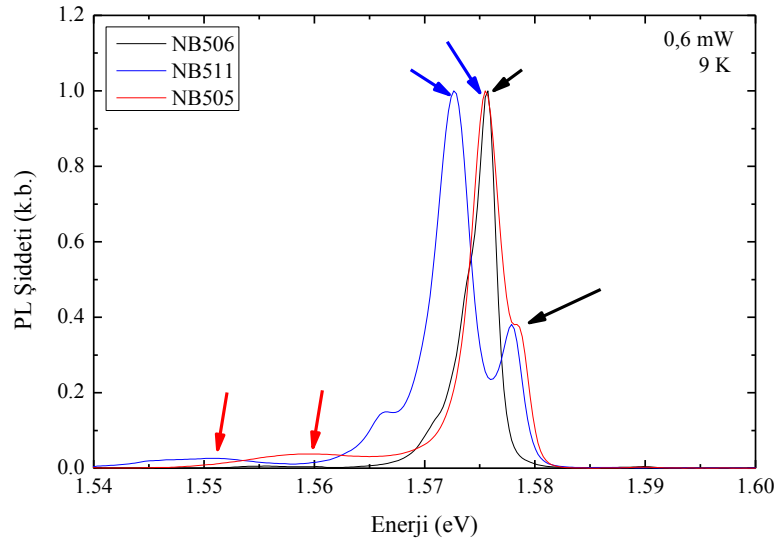
Örnek Kodu	$E_1 \rightarrow HH_1$ (eV)	E_1-1s (meV)	E_1-2p_{\pm} (meV)
NB511	1,5779	27,1	5,2
NB505	1,5799	18,7	2,9
NB506	1,5757	-	-
NB507	1,5799	12,7	3,3
NB508	1,5787	10,7	2,3

Biri kuyu merkezi (NB507) ve diğeri kuyu kenarına doğru (NB508) Si delta katkılanan örnekler için düşük sıcaklıkta 0,6 mW lazer uyarım şiddeti altında alınan PL ölçüm sonuçları Şekil 5.7’de verilmiştir. Bu grafikte $E_1 \rightarrow HH_1$ geçişlerine karşılık gelen tepeler siyah oklarla, $2p_{\pm} \rightarrow HH_1$ geçişlerine karşılık gelen tepeler mavi oklarla ve $1s \rightarrow HH_1$ geçişlerine karşılık gelen omuzlar ise kırmızı oklarla işaretlenmiştir. Bu sonuçlardan elde edilen sayısal değerler Tablo 5.5’te sunulmuştur. NB507 kod numaralı örneği için $1s$ bağlanma enerjisi 12,7 meV ve $2p_{\pm}$ bağlanma enerjisi 3,3 meV olarak belirlenmiştir. NB508 kod numaralı delta katkılamanın kuyu kenarına doğru yapıldığı örnekte ise $1s$ bağlanma enerjisi 10,7 meV ve $2p_{\pm}$ bağlanma enerjisi 2,3 meV olarak belirlenmiştir. Bu durum teoride beklendiği gibi safsızlık atomlarının kuantum kuyu kenarına doğru konumlandıkça bağlanma enerjilerinin azalması gerektiği durumunu doğrulamaktadır. Ayrıca NB507 kod numaralı örneğinin parametreleri kullanılarak yapılan hesaplamalarda $1s$ bağlanma enerjisi için -12,2 meV ve $2p_{\pm}$ bağlanma enerjisi için -2,3 meV değerleri elde edilmiştir. NB508 kod numaralı örneği için yapılan hesaplamalarda ise $1s$ bağlanma enerjisi için -10,5 meV ve $2p_{\pm}$ bağlanma enerjisi için -2,3 meV değerleri elde edilmiştir. Özellikle $1s$ bağlanma enerjisi için elde edilen değerler PL sonuçları ile uyumludur. $2p_{\pm}$ bağlanma enerjisi için elde edilen değerlerdeki farkların muhtemel sebebinin ölçüm sisteminin hassasiyeti ve tepe konumlarının belirlenmesindeki hatalar olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 5.7 NB506 kod numaralı katkısız referans örneği ile birlikte Si delta katkılı çoklu kuantum kuyu yapıların 9 K sıcaklıkta 0,6 mW lazer şiddeti altında alınan PL ölçümlerinin normalize edilmiş grafikleri

Benzer bir grup örnek Be safsızlık atomları için büyütme parametreleri Tablo 5.3'te verilen NB511 ve NB505 kod numaralı örnekleriyle oluşturulmuştur. Bu grup için yapılan düşük sıcaklık PL ölçüm sonuçları Şekil 5.8'de verilmiş ve bu sonuçlardan elde edilen sayısal değerler de Tablo 5.5'te sunulmuştur. Yine benzer olarak grafikte $E_1 \rightarrow HH_1$ geçişlerine karşılık gelen tepeler siyah oklarla, $2p_{\pm} \rightarrow HH_1$ geçişlerine karşılık gelen tepeler mavi oklarla ve $1s \rightarrow HH_1$ geçişlerine karşılık gelen omuzlar ise kırmızı oklarla işaretlenmiştir. Kuantum kuyu merkezi delta katkılanan NB511 kod numaralı örneği için $1s$ bağlanma enerjisi 27,1 meV ve $2p_{\pm}$ bağlanma enerjisi 5,2 meV olarak belirlenmiştir. Delta katkılamamanın kuyu kenarına doğru yapıldığı NB505 kod numaralı örneği için $1s$ bağlanma enerjisi 18,7 meV ve $2p_{\pm}$ bağlanma enerjisi 2,9 meV olarak belirlenmiştir. Bölüm 2.2.3'te kuramsal olarak safsızlık atomlarının konumunun kuantum kuyu içindeki değişimi $1s$ ve $2p_{\pm}$ bağlanma enerjilerini ve $1s-2p_{\pm}$ enerji farkını değiştireceğinden bahsedilmiştir. Bu örnek grubunda hem Si hem de Be safsızlık atomları için delta katkılama konumu merkezden kuyu kenarına doğru kaydığında $1s$ ve $2p_{\pm}$ bağlanma enerjilerinin azaldığı net olarak görülmüştür. Ayrıca $1s-2p_{\pm}$ enerji farkı delta katkılama $z_i=0,0$ 'dan $z_i=0,3$ 'e konumuna kaydığında Si için 9,4 meV'den 8,4 meV değerine ve Be için 21,9 meV'den 15,8 meV değerine azaldığı görülmüştür.



Şekil 5.8 NB506 kod numaralı katkısız referans örneği ile birlikte Be delta katkılı çoklu kuantum kuyu yapıların 9 K sıcaklıkta 0,6 mW lazer şiddeti altında alınan PL ölçümlerinin normalize edilmiş grafikleri

5.2. Asimetrik Çift Engel Tınlaşım Tünelleme Diyot Yapılar Üzerinden Safsızlık Seviyelerinin Optoelektronik Karakterizasyonları

Çoklu kuantum kuyu yapılar için yapılan PL ölçümleri ve analizleri yardımıyla MBE sisteminde kullanılacak iyileştirilmiş büyütme koşulları belirlenmiştir. Belirlenen bu parametrelerle δ -katkılı safsızlık atomları üzerinden tünellemenin gözlenebilmesi için çift engel tınlaşım tünelleme yapılar büyütülmüştür. Büyütülen çift engel tınlaşım tünelleme diyot örnekleri için karanlık akım, voltaj bağımlı PL ve manyetik alan altında karanlık akım ölçümleri yapılarak delta katkılanmanın başarılı olduğu gösterilmiştir. Ayrıca voltaj bağımlı PL ölçümlerinden çoklu kuantum kuyu örneklerinden elde edilen safsızlık atomlarının hidrojenik bağlanma enerjileri doğrulanmıştır. Si ve Be safsızlık atomları kullanılarak iki grup örnek hazırlanmıştır.

5.2.1. Si delta katkılı tınlaşım tünelleme diyot örnekleri

Si delta katkılı çift engel tınlaşım tünelleme diyot örneklerinin genel yapısı Tablo 5.6'da verilmiştir. Kuyu genişliği, katkı yoğunlukları ve katkıların kuantum kuyu içindeki konumları değiştirilerek oluşturulan örnek grubu Tablo 5.7'de gösterilmiştir. NB365 katkısız referans örneği olmak üzere NB364, NB366 ile NB368 örneklerinde kuyu merkezleri farklı düzeylerde katkılanmıştır. NB367 örneğinde delta katkılama kuyunun merkezinde değil engelden 2 nm önce ($z=0,3$) yapılmıştır. NB368 örneğinde kuyu genişliği azaltılarak bağlanma enerjisinin arttığı gözlenmesi hedeflenmiştir.

Tablo 5.6 Si delta katkılı asimetrik çift engel tınlaşım diyot yapısı

Katman	Kalınlık (nm)	Katkı (cm^{-3})
GaAs (Üst Kontak)	400	Si: $1,0 \times 10^{18}$
GaAs	100	Si: $2,0 \times 10^{16}$
GaAs	20	
$\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ (Engel)	5	
GaAs (Kuantum Kuyu)	10	Merkez δ -katkılı $3,0 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$
$\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ (Engel)	6	
GaAs	20	
GaAs	100	Si: $2,0 \times 10^{16}$
GaAs (Alt Kontak)	700	Si: $1,0 \times 10^{18}$
GaAs Yarı Yalıtkan Alttaş		

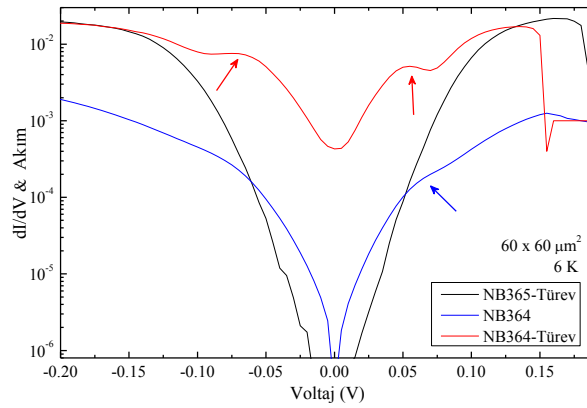
Tablo 5.7 Si delta katkılı çift engel tınlaşım tünelleme örnekleri için MBE büyütme parametreleri

Örnek Kodu	Kuantum Kuyu Genişliği (nm)	Katkı miktarı (cm ⁻²)
NB364	10	3x10 ¹⁰
NB365	10	yok
NB366	10	1x10 ¹⁰
NB367	8+2	3x10 ¹⁰
NB368	8	5x10 ¹⁰

Bu örnekler büyütme sonrasında fotolitografik ve ıslak aşındırma işlemleriyle aygıt haline getirilmişlerdir (Bölüm 3.3). Ni/Ge/Au kullanılarak metal kaplanan örnekler 425°C sıcaklıkta 60 s tavlansak kontak almaya hazır hale getirilmişlerdir. Taşıyıcı paket üzerine yapıştırılan örnekler için Au teller ile bağlantılar yapılmıştır.

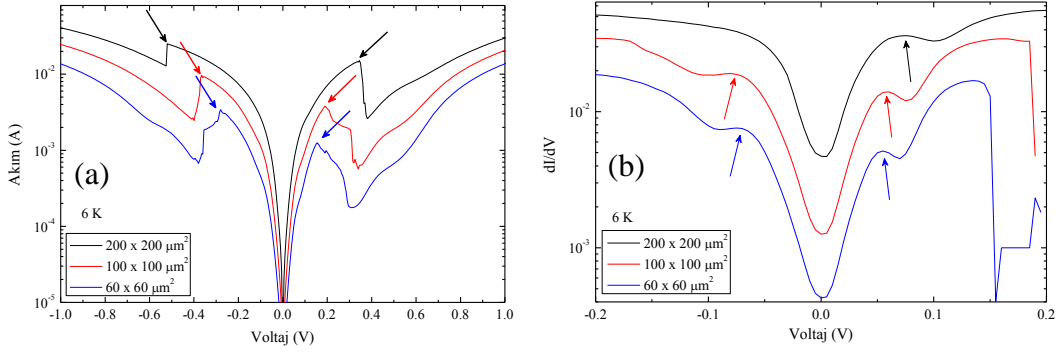
5.2.1.1. Si delta katkılı tınlaşım tünelleme diyot örnekleri için karanlık akım ölçümleri

Aygıt halindeki örnekler kreostat içine yerleştirilerek karanlık akım ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlerde referans örneği olarak kullanılacak olan örnek kuantum kuyuları delta katkılanmayan NB365 kod numaralı örneğidir.

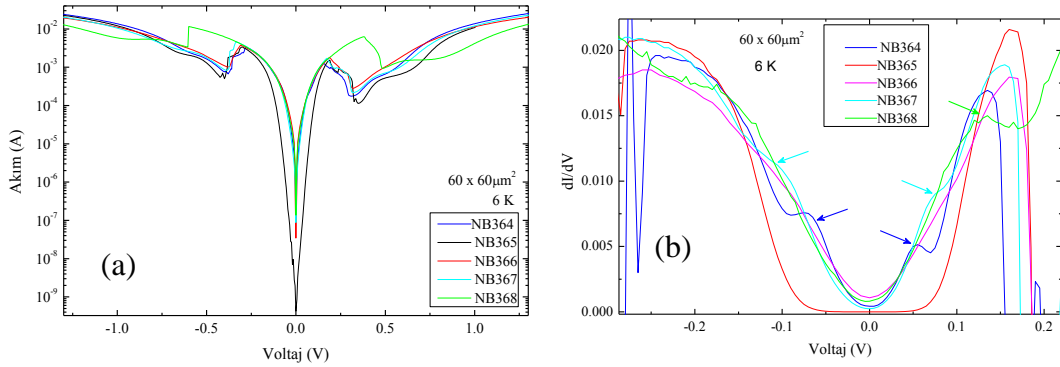


Şekil 5.9 NB364 ve NB365 kod numaralı çift engel tınlaşım tünelleme yapısına sahip örnekleri için 60 x 60 μm² boyutundaki aygıtlar için 6 K sıcaklıkta yapılan karanlık akım ölçüm sonuçları

Şekil 5.9’da delta katkılı NB364 ve ölçümlerinde referans örneği olarak kullanılan NB365 kod numaralı örneklerinin düşük sıcaklık karanlık akım I-V sonuçlarının türevleri verilmiştir. Delta katkılı safsızlık atomlarının varlıklarının daha net olarak görülebilmesi için örneklerin akım-voltaj eğrilerin türevleri alınarak gösterilmiştir. Grafikte mavi renkle gösterilen NB364 kod numaralı örneğinin I-V sonucunda mavi okla gösterilen bölgedeki omuz, türev grafiğinde kırmızı oklarla gösterilen tepe noktaları olarak görünmektedir. Ancak NB365 kod numaralı referans örneğinin türevinden bu bölgede herhangi bir tepe gözlenmemektedir. Daha geniş spektrumdaki NB365 kod numaralı örneğin ölçüm sonuçları Şekil 5.10 (a)'da verilmiştir: oklarla gösterilen bölgeler kuantum kuyu temel enerji seviyesi üzerinden tınlaşım tünelleme noktalarını göstermektedir. Şekil 5.10 (b)'de, (a)'da verilen grafikteki düşük voltaj bölgesinin türevi yaklaşıtırlarak gösterilmiştir. Türev grafiğinde safsızlık seviyeleri üzerinden gerçekleşen tınlaşım tünellemeye karşılık gelen tepeler oklarla gösterilmiştir. Engeller asimetrik olduğundan tınlaşım tünellemelerin gözlemlendiği eksi ve artı voltaj değerleri birbirinden farklıdır. Engel kalınlıklarının farklı olması kuyu bölgesindeki elektrik alanı değiştirmektedir. Bu nedenle tınlaşım voltaj değeri değişmektedir. Şekil 5.10 için yapılan analizlerde kuyu temel enerji seviyesi üzerinden tınlaşım tünelleme noktaları sırasıyla -0,246 V ve 0,136 V değerlerinde oldukları belirlenmiştir. Safsızlık enerji seviyeleri üzerinden tınlaşım için ise sırasıyla -0,075 V ve 0,054 V değerlerinde olduğu belirlenmiştir. Safsızlık atomlarının enerji seviyeleri kuyu temel enerji seviyelerinin altında hizalandıklarından tınlaşım, voltaj artarken önce safsızlık enerji seviyeleri sonra kuyu enerji seviyeleri üzerinden görülmektedir. Negatif voltaj bölgesinde tınlaşım tünellemeler yüksek voltaj değerlerinde gözlemlenmektedirler; bu bölgede artan toplam akımdan dolayı özellikle büyük boyutlu aygıtlarda safsızlık seviyeleri gözlenmemektedir. Bu durum Şekil 5.10 (b)'den görülmektedir: Aygıt boyutu küçüldükçe toplam akım azalmakta ve tınlaşım tünelleme noktaları daha belirginleşmektedir. Bu nedenle diğer ölçüm sonuçları en küçük boyutlu aygıt üzerinden verilmiştir.



Şekil 5.10 NB365 kod numaralı örnek için 6 K'de farklı boyuttaki aygıtlardan yapılan karanlık akım ölçümleri; (a) Akım-voltaj, (b) akım türevi-voltaj sonuçları.



Şekil 5.11 Çift engel tınlaşım tünelleme örnek grubu için $60 \times 60 \mu\text{m}^2$ boyutlarındaki aygıtlardan 6 K sıcaklıkta alınan karanlık akım ölçümleri; a) akım-voltaj ve b) akım türevi-voltaj grafikleri

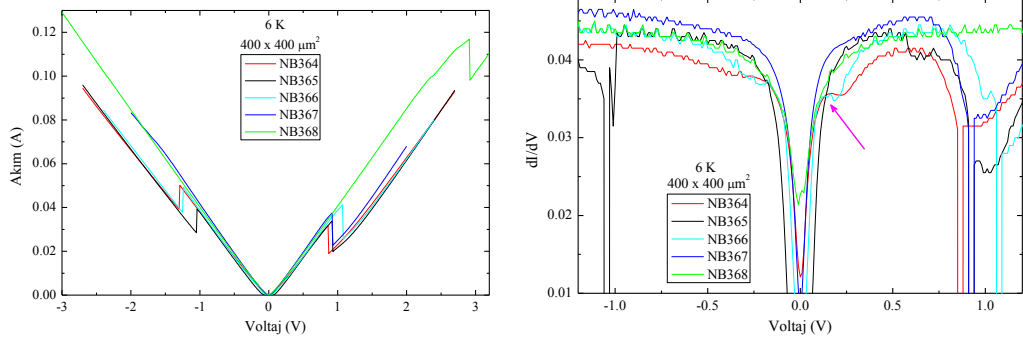
Şekil 5.11 (a)'da NB368 kod numaralı örnek için kuyu temel seviyesi üzerinden tınlaşım voltaj değerleri diğer örneklerle kıyaslandığında daha yüksektir. Bu örneğin kuantum kuyusu daha dar olduğundan kuyu enerji seviyeleri de daha yüksektir. Tınlaşım tünellemede daha yüksek voltaj değerlerinde gözlemlenmektedir. Diğer örnekler için bu değerler küçük kaymalar olmakla birlikte aynı bölgededir. Şekil 5.11 (b)'de safsızlık seviyeleri üzerinden tınlaşım tünelleme noktaları oklarla gösterilmiştir. NB364 ile aynı büyütme parametreleriyle daha düşük yoğunlukta katkılanan NB366 kod numaralı örneğinden safsızlık seviyeleri üzerinden tınlaşım tünelleme gözlenememiştir. Bunun nedeni, bu örnekteki delta katkı yoğunluğunun katkılı diğer örneklere göre çok düşük olmasındandır. Ölçümlerin sayısal analizleri bu örnekler için yapılan voltaj bağımlı PL ölçümleriyle birlikte verilecektir.

Tablo 5.8 *Çift engel tınlaşım tünelleme örnekleri için karanlık akım ölçümlerinin sayısal sonuçları*

Örnek Kodu	E_1 Tınlaşım (V)	Safsızlık Tınlaşım (V)	Fark (V)	Oran
NB364	0,154	0,058	0,096	0,377
NB365	0,184	--	-	
NB366	0,184	-	-	
NB367	0,171	0,079	0,092	0,462
NB368	0,379	0,133	0,246	0,351

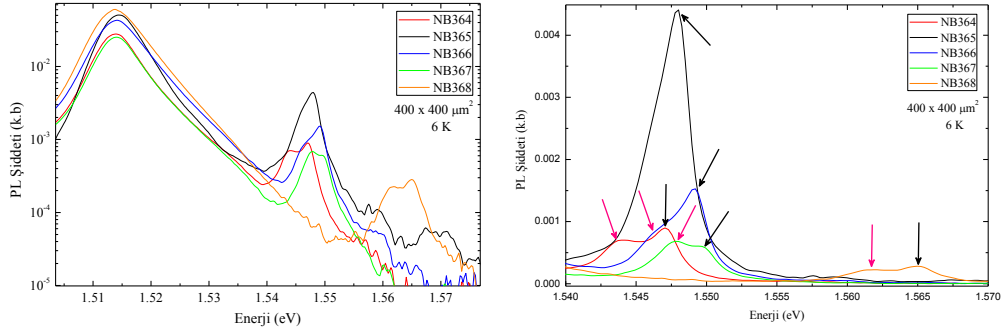
5.2.1.2. Si delta katkılı tınlaşım tünelleme diyot örnekleri için voltaj bağımlı PL ölçümleri

Karanlık akım-voltaj ölçümleri yapılan çift engel tınlaşım tünelleme örneklerinin voltaj bağımlı PL ölçümlerinin yapılabilmesi için tasarlanmış maske kullanılarak yeni bir ölçüm grubu hazırlanmıştır. Şekil 3.11 (a)'da şematik yapısı verilen bu maske masatepsi halka şeklinde metal kaplanıp halkanın iç kısmı lazer ışığını ve örnekten gelen sinyalleri geçirmesi amacıyla boş bırakılmış bir tasarıma sahiptir. Ayrıca kuantum kuyu enerji seviyeleri arasındaki geçişlerden gelen sinyallerin daha az soğurulmasını sağlamak amacıyla halka içleri kuyu bölgesine kadar aşındırılmıştır. Ancak bu tasarım masatepe boyutlarının büyümesi sonucunu doğurmuştur. Büyük boyutlardaki aygıtlarda hem yapıdan geçen toplam akım miktarı artmakta hem de seri direncin daha büyük olması nedeniyle tınlaşım tünellemenin görüldüğü voltaj değerleri daha büyük voltaj bölgelerine kaymaktadır. Çift engel tınlaşım tünelleme örnek grubundan düşük sıcaklıkta alınan akım-voltaj ölçümleri Şekil 5.12'de verilmiştir. Sol tarafta verilen I-V ölçüm sonuçlarında kuyu temel enerji seviyeleri üzerinden tınlaşım tünelleme net bir şekilde görülebilmektedir. Sağ taraftaki grafikte ise I-V ölçüm sonuçlarının türevlerinde NB364 ve NB366 kod numaralı örneklerinde safsızlık seviyeleri üzerinden tınlaşım tünelleme bölgeleri (okla işaretlenen) görülmektedir.



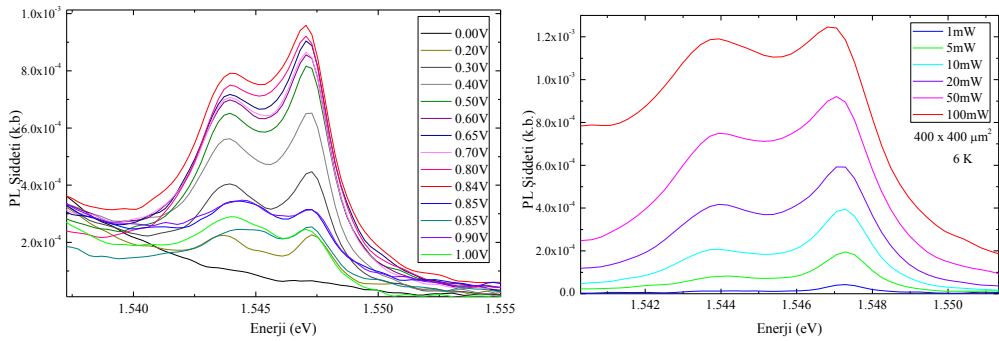
Şekil 5.12 Çift engel tınlaşım tünelleme örnek grubu için $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ boyutlarındaki aygıtlardan 6 K sıcaklıkta yapılan akım-voltaj (solda) ve akım türevi-voltaj ölçüm sonuçları

I-V ölçüm sonuçları verilen bu örnek grubu için aynı koşullarda farklı lazer şiddetleri altında PL ölçümleri yapılmıştır. Şekil 5.13'te bu örnek grubu için tınlaşım tünelleme voltaj değerlerini geçmeyecek en yüksek voltaj değerlerinde alınan PL ölçüm sonuçları verilmektedir. Sol panelde logaritmik eksenle verilen ölçüm sonuçlarında en yüksek sinyal şiddeti veren tepe GaAs'ın ekzitonik seviyelerinden gelmektedir. Bu grafikte ikinci yüksek tepeler sağ panelde yakınlaştırılarak verilmiştir. Bu grafikte $E_1 \rightarrow HH_1$ geçişlerine karşılık gelen sinyallerin örnekler için siyah oklarla ve $2p \rightarrow HH_1$ geçişlerine karşılık gelen sinyaller ise mavi renkli oklarla tepe noktaları gösterilmiştir. Kuantum kuyu genişliği daha dar olan NB368 kod numaralı örneğin bu sinyalleri beklendiği gibi daha yüksek enerji bölgesindedir. Ayrıca çoklu kuantum kuyu PL ölçüm sonuçlarında olduğu gibi NB365 kod numaralı katkısız referans örneğinin sonuçlarında da sadece $E_1 \rightarrow HH_1$ geçişleri gözlemlenmektedir. NB364 kod numaralı örneği için sol panelde 50 mW lazer ışın şiddeti altında voltaj bağımlı PL sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlardan tınlaşım tünelleme voltaj değerlerinin aşıldığında sinyal şiddetlerinin aniden düştüğü gözlemlenmektedir. Bu durumun temel nedeninin tınlaşım tünelleme voltaj değerinde taşıyıcıların kuyu içinden çok hızlı akıp değerlik bandındaki boşluklarla yeniden birleşme yapabilecek kadar süreye sahip olmamaları olarak yorumlanmıştır. Şekil 5.15'te bu ölçüm sonuçlarından elde edilen tepe nokta sinyal şiddeti değerleri voltaj bağımlı olarak verilmiştir.

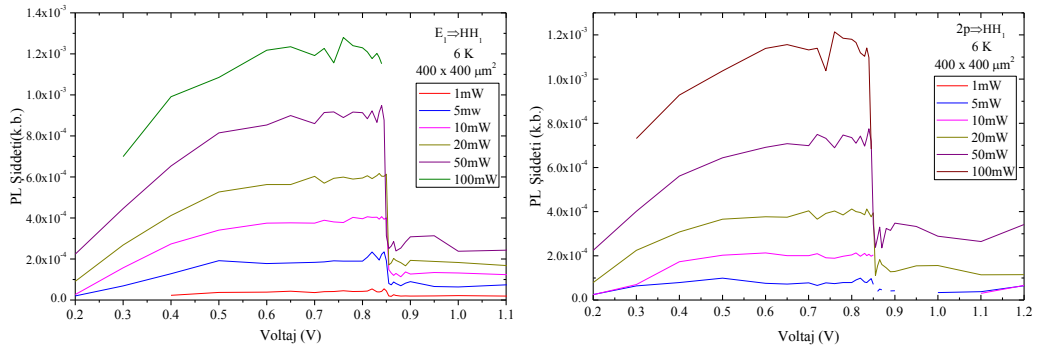


Şekil 5.13 Çift engel tınlaşım tünelleme örnek grubu için $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ boyutlarındaki aygıtlardan 6 K sıcaklıkta 50 mW lazer şiddeti altında voltaj uygulanarak alınan PL ölçüm sonuçları. Sonuçlar sağda logaritmik eksen ve solda normal eksen verilmektedir

Şekil 5.14'de sağ panelde NB364 kod numaralı örneğine sabit 0,8 V voltaj uygulanarak farklı lazer şiddetleri altında PL ölçümleri alınmıştır. Burada kullanılan voltaj değeri NB364 kod numaralı örnek için Şekil 5.12'den görülebileceği gibi tınlaşım tünelleme voltaj değerinden küçüktür. Şekil 5.14'den de görülebileceği gibi bu voltaj değerinin üzerinde tınlaşım tünelleme meydana geldiğinden sinyal şiddetleri çok azalmaktadır.



Şekil 5.14 Çift engel tınlaşım tünelleme örnek grubu için $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ boyutlarındaki aygıtlardan 6 K sıcaklıkta 50 mW lazer şiddeti altında farklı voltaj değerleri için (sol panel) ve sabit voltaj farklı lazer şiddetleri için (sağ panel) düşük sıcaklık PL ölçüm sonuçları



Şekil 5.15 NB364 kod numaralı örnek için $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ boyutundaki aygıttan 6 K sıcaklıkta farklı lazer şiddetleri altında voltaj bağımlı PL ölçümlerinden elde edilen sinyal yükseklikleri; $E_1 \rightarrow HH_1$ geçişlerine ait tepe yükseklikleri solda ve $2p \rightarrow HH_1$ geçişlerine ait tepe yükseklikleri sağda verilmiştir

Bu durum detaylı olarak Şekil 5.15'de görülmektedir. Şekil 5.15'de farklı lazer ışına şiddeti altında sol panelde $E_1 \rightarrow HH_1$ geçişlerine karşılık gelen tepelerin şiddet değerlerinin uygulanan voltaja bağlı olarak değişimi verilmektedir. Sağ panelde ise voltaja karşılık $2p \rightarrow HH_1$ geçişlerine karşılık gelen tepelerin şiddet değerleri verilmiştir. Bu örnek grubu için yapılan voltaj bağımlı PL ölçüm sonuçlarından elde edilen safsızlık seviyeleri bağlanma enerjileri ile kuyu genişlikleri farklı olması yanında aynı delta katkılama işlemlerine tabi tutulan çoklu kuantum kuyu örneklerinden bu seviyeler için elde edilen sonuçlar son derece tutarlıdır.

Tablo 5.9 Çift engel tünelleme örnekleri için voltaj bağımlı PL ölçümlerinin sayısal sonuçlar

Örnek Kodu	$E_1 \rightarrow HH_1$ (meV)	Ölçülen E_{2p} (meV)	Hesaplanan E_{2p} (meV)
NB364	1,5470	2,8	2,26
NB365	1,5478	--	
NB366	1,5490	2,4	2,27
NB367	1,5496	2,1	2,17
NB368	1,5650	3,0	2,31

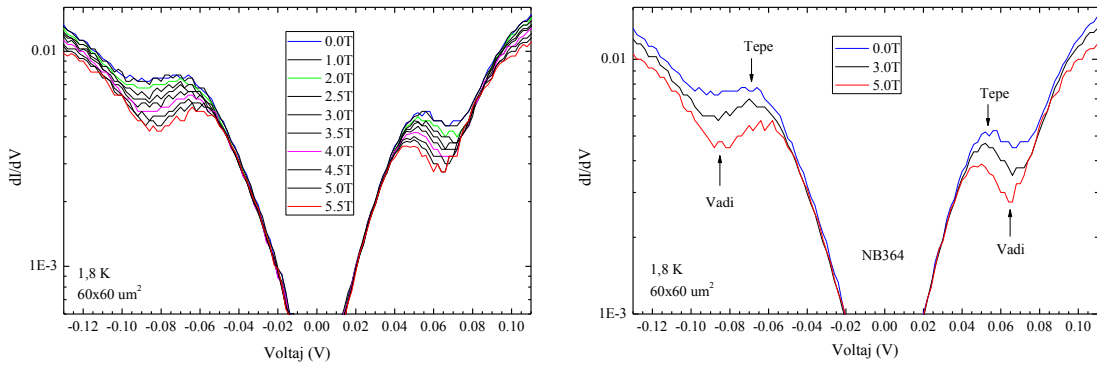
NB365 kod numaralı katkısız referans örneğinde I-V ölçüm sonuçlarında (Tablo 5.9) da görüldüğü gibi safsızlık seviyelerine ait herhangi bir sinyal gözlenmemiştir. Bu da PL ölçüm sonuçlarında $2p \rightarrow HH_1$ geçişlerine atfedilen sinyallerin safsızlık seviyelerinden geldiği fikrini ispatlar niteliktedir. Bu örneklerin PL ölçümlerinden

belirlenen $E_1 \rightarrow HH_1$ geçiş sinyallerinin enerji değerleri üzerinden yapılan hesaplamalar yardımıyla belirlenen kuyu genişlikleri üzerinden yapılan safsızlık atomları bağlanma enerjisi hesapları Tablo 5.9'da verilmiştir. Teorik hesaplamalardan görüldüğü gibi delta katkılamının kuyu merkezinde yapıldığı NB364 kod numaralı örneği ile delta katkılamının kuyu kenarına yakın bir bölgeye yapıldığı NB367 kod numaralı örnekleri için 2p bağlanma enerji değerleri farklıdır. Tablo 5.9'da sunulan sonuçlarda NB364 için 2,26 meV ve NB367 için 2,17 meV hesaplanan değerler bu durumu göstermektedir. Hesaplanan değerler ölçüm sonuçlarıyla kıyaslandığında da aynı ayırım gözlenmektedir. Ancak, ölçüm sonuçlarından elde edilen sayısal değerlerde belli bir çözünürlük sağlanabilmektedir ve bu da hesaplanan değerlerle beklenenden farklılıklar yaratabilmektedir. Teoride beklendiği gibi ölçüm sonuçlarından da NB367 kod numaralı örneğinin 2p safsızlık bağlanma enerjisi NB364 kod numaralı örneğin 2p bağlanma enerjisinden küçüktür. Bu durum düşük sıcaklık I-V sonuçlarının verildiği Tablo 5.8'de voltaj farkı olarak verilen sütundaki farklarla orantılıdır ve birbirlerini desteklemektedirler (NB364 için 0,096V ve NB367 için 0,092V). Kuantum kuyu genişlikleri aynı olan NB366 kod numaralı örneği ile NB364 kod numaralı örneği için ölçülen bağlanma enerjisi değerleri uyumludur. Kuantum kuyu genişliğinin azalması kuyu içi enerji seviyeleriyle birlikte safsızlık atomları bağlanma enerjilerinin de artmasına neden olur. Bu durum kuantum kuyu genişliği NB364 kod numaralı örneğine göre dar olan NB368 kod numaralı için hesaplanan ve ölçüm sonuçlarından elde edilen değerlerde görünmektedir (Tablo 5.9). Tablo 5.8'deki I-V sonuçlarında voltaj farkı olarak verilen ve safsızlık atomlarının bağlanma enerjilerine atfedilen NB364 için 0,096V ve NB368 için 0,246V değerleri PL ölçüm sonuçlarıyla aynı orantılılığı göstermektedir.

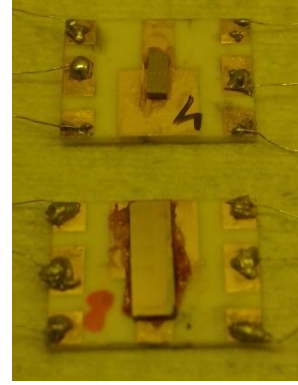
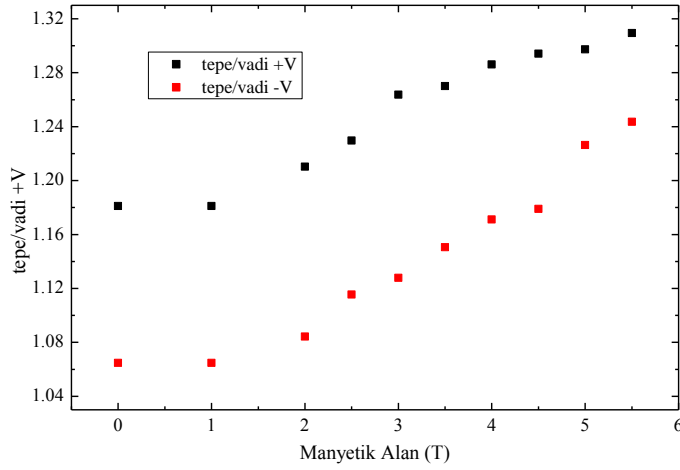
5.2.1.3. *Si delta katkı tınlaşım tünelleme diyot örnekleri için manyetik alan altında karanlık akım ölçümleri*

Önceki bölümlerde sonuçları verilen çift engel tınlaşım diyot yapıların akım-voltaj (I-V) ölçümlerinde görülen karakterlerin katkı atomlarından kaynaklandığını doğrulamak ve bu davranışları daha iyi anlayabilmek için örneklerin I-V karakteristikleri manyetik alan altında kontrol edilmiştir. Yapı içinde akan akımla aynı doğrultudaki (büyütme doğrultusu) manyetik alan için kuantum kuyu düzleminde ve

kontakt bölgelerinde elektron hareketi Landau seviyelerine sınırlanır. Böylece, sadece safsızlık atomlarının bağlanma enerjileri değil 1s-benzeri taban seviyesi ve 2p-benzeri uyarılmış enerji seviyesi arasındaki fark da ($|1s-2p|$) artan manyetik alan şiddetiyle birlikte artar. $3,0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ seviyesinde Si katkı atomlarıyla katkılanmış NB364 kod numaralı örnekte gözlenen tünelleme karakterinin manyetik alan şiddetine göre değişimi Şekil 5.16’da gösterilmiştir. Ölçümler, tünelleme etkisinin daha belirgin görülmesi için akımın voltaja göre birinci türevi alınarak gösterilmiştir. Manyetik alanın etkisini sayısallaştırmak için tünelleme karakterindeki tepe değerinin vadi değerine (Şekil 5.16) oranı alınmış ve sonuçlar Şekil 5.17’de gösterilmiştir. Genel olarak, manyetik alanın artmasıyla birlikte tınlaşım tünellemenin iyileşmesi nedeniyle tepenin vadiye oranı da iyileşmiştir (artmıştır). Bu, Landau seviyelerinin sınırlanması nedeniyle beklenen bir sonuçtur. Manyetik alan ölçümlerinden daha fazla bilgi alabilmek için daha büyük manyetik alan şiddetlerine çıkılması planlanmış ancak birden fazla defa yapılan ölçümlerin hepsinde de örneklerin altın tel bağlantıları 5,5 T değerinden sonra kopmuştur. O nedenle ölçümler 5,5 T değerine kadar yapılabildiği. Manyetik alan ölçümleri, Anadolu Üniversitesi Fizik Bölümü’nde Prof. Dr. Engin Tıraş yönetimindeki Optoelektronik Malzemeler ve Aygıtlar Araştırma Laboratuvarı’ndaki 11 T manyetik alan sisteminde yapılmıştır.



Şekil 5.16 Si katkı NB364 numaralı tınlaşım tünelleme diyot yapılı örnek için büyütme doğrultusundaki manyetik alanın tünelleme karakterine etkisi



Şekil 5.17 Şekil 5.16'da gösterilen tepe ve vadi değerlerinin oranlarının manyetik alan şiddetine göre değişimi (sol). Manyetik alan ölçümleri için hazırlanan seramik taşıyıcı üzerine yerleştirilen örneklerin fotoğrafı (sağ)

5.2.2. Be delta katkı tınlaşım tünelleme diyot örnekleri

Be safsızlık atomları için de bir grup tınlaşım tünelleme örneği büyütülmüş ve örneklerin genel yapısı Tablo 5.10'da verilmiştir. Büyütme detayları Tablo 5.11'de verilen örnekler sınırlandırılmış safsızlık atomlarının özelliklerini I-V ölçümlerinde ortaya koymak amacıyla farklı katkı miktarları, farklı kuyu içi konumları ve farklı kuyu genişlikleri olacak şekilde büyütülmüştür. NB518 kod numaralı örnek katkısız referans örneğidir. NB517, NB516 kod numaralı örneğine göre düşük katkılanmıştır. NB519 kod numaralı örneği sınırlandırılmış safsızlık atomlarının bağlanma enerjilerinin kuantum kuyu içindeki konuma bağlılığını göstermesi için kuyu kenarına doğru ($z=0,3$) delta katkılanmıştır. NB520 kod numaralı örneğinde kuantum kuyu genişliği azaltılmıştır. Büyütülen örneklerin fabrikasyon işlemleri tamamlanmış ve Cr/Au ile metal kaplanarak aysıt haline getirilmiştir. Paket haline getirilen örnekler için farklı masatepe boyutlarında I-V ölçümleri alınmıştır. Büyütme parametreleri üzerinden yapılan hesaplamalarda NB518 kod numaralı referans örneğinde değerlik bandı ağır boşluk temel enerji seviyesi (HH1) 34,49 meV (6K sıcaklıkta 4,5 nm kuyu genişliği için) değerindeyken dar kuyulu NB520 kod numaralı örneğinde bu değer 64,38 meV değerlerine çıkmaktadır. Bu da I-V ölçümlerinde NB520 kod numaralı örneği için HH₁ enerji seviyesinin daha yüksek elektrik alan değerlerinde tınlaşımına uğrayacağını

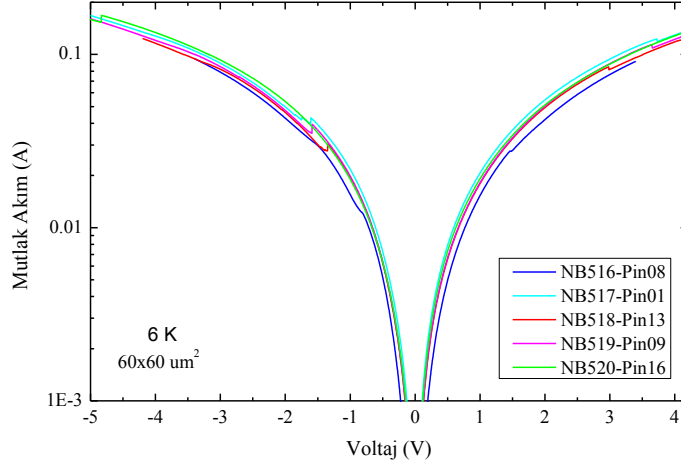
göstermektedir. Yani aynı masatepe büyüklüğü için NB518 örneğine göre daha yüksek voltaj değerlerinde tınlaşım tünelleme görüleceği beklenmektedir. Ölçüm sonuçlarında NB518 kod numaralı referans örneği için negatif voltaj bölgesinde -1,35 V değerinde kuyu temel seviyesi üzerinden tınlaşım tünelleme gözlemlenirken NB520 kod numaralı örnekte -4,83 V değerinde kuyu temel seviyesi üzerinden tınlaşım tünelleme gözlemlenmektedir. Diğer örnekler için HH₁ enerji seviyeleri aynı olduğundan referans örneğiyle yaklaşık aynı voltaj değerlerinde tınlaşım tünelleme gözlemlenmesi gerekmektedir. Bu durum Şekil 5.18’de I-V ölçüm sonuçlarında görülmektedir.

Tablo 5.10 *Be için asimetrik çift engel tınlaşım diyot yapısı*

Katman	Kalınlık (nm)	Katkı (cm ⁻³)
GaAs (Üst Kontak)	200	Be: 1,0x10 ¹⁹
GaAs	100	Be: 1,0x10 ¹⁸
GaAs	10	
AlAs (Engel)	2	
GaAs (Kuantum Kuyu)	4,5	Merkez δ -katkılı 3x10 ¹⁰ cm ⁻²
AlAs (Engel)	2,5	
GaAs	10	
GaAs	100	Be: 1,0x10 ¹⁸
GaAs (Alt Kontak)	700	Be: 1,0x10 ¹⁹
GaAs Yarı Yalıtkan Alttaş		

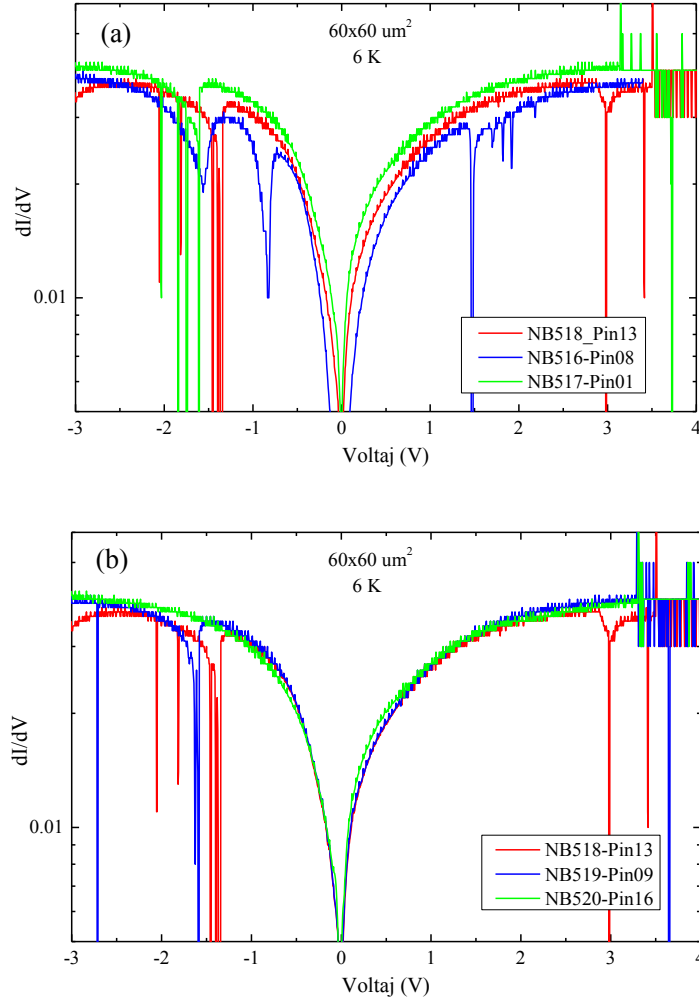
Tablo 5.11 *Be delta katkıli çift engel tınlaşım tünelleme örnekler ve büyütme parametreleri*

Örnek Kodu	δ -Katkı Miktarı (cm ⁻²)	Kuyu Genişliği (nm)	δ -Katkı konumu
NB516	3x10 ¹⁰	4.5	Merkez
NB517	1x10 ¹⁰	4.5	Merkez
NB518	-	4.5	-
NB519	3x10 ¹⁰	4.5	Kenar
NB520	3x10 ¹⁰	3.0	Merkez



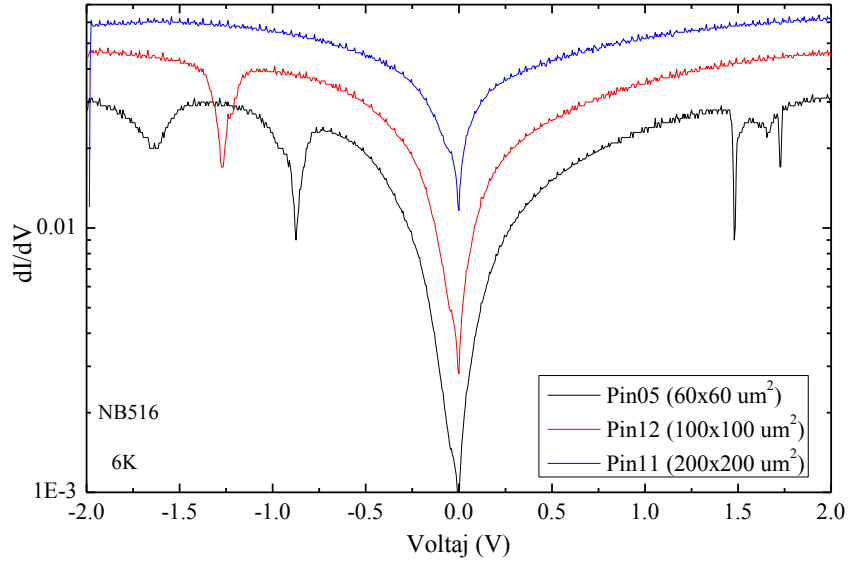
Şekil 5.18 Çift engel tınlaşım tünelleme örnekleri için $60 \times 60 \text{ um}^2$ masatepe boyutlarındaki aygıtların 6 K sıcaklıkta Akım-Voltaj (I-V) ölçüm sonuçları

Ancak Şekil 5.18'deki I-V ölçümlerinden de görülebileceği gibi HH1 enerji seviyesi üzerinden tınlaşım tünellemeler ancak yüksek akım değerlerinde gözlenebilmiştir. Bunun sonucu olarak birinci ağır boşluk enerji seviyesi tınlaşım tünellemesine göre çok daha küçük bir genlikteki safsızlık seviyeleri üzerinden tünellemeyi gözlemek imkânsızlaşmıştır. Daha önce Si katkılı n-tipi çift engel tınlaşım tünelleme örneklerinde kuantum kuyuların daha geniş tutularak bu sorun giderilmişti. Fakat değerlik bandında ağır ve hafif boşluk enerji değerleri birbirlerine çok yakın olduğundan daha geniş kuyularda bu enerji seviyeleri bir birlerinin içlerine gireceğinden I-V ölçümlerinden anlamlı sonuçlar çıkarmak mümkün olmayacaktır.



Şekil 5.19 a) NB518, NB516 ve NB517, b) NB518, NB519 ve NB520 kod numaralı örnekleri için voltaja karşı akım türevi grafikleri

Şekil 5.19 (a) ve (b)'de, yapılan I-V ölçümlerinden elde edilen voltaja karşı akımın birinci türevi grafikleri verilmiştir. Bu grafiklerde ağır boşluk seviyesi üzerinden tınlaşım tünelleme net bir şekilde gözlemlenirken safsızlık seviyelerine dair net bir bilgi elde edilememiştir. Şekil 5.20'de ise masatepe boyutuna bağlı olarak davranışın nasıl değiştiği görülmektedir; masatepe büyüdükçe yapıdaki seri direncin etkisiyle akım artmakta ve tınlaşım tünellemeden kaynaklanan akımdaki düşüşler de daha yüksek voltaj değerlerine doğru kaymaktadır.



Şekil 5.20 NB516 kod numaralı örneği için 6 K sıcaklıkta farklı masatepe boyutları için yapılan I - V ölçümlerinden elde edilen voltaja karşılık akımın birinci türevi grafikleri

6. THz DEDEKTÖR YAPILARIN OPTOELEKTRONİK KARAKTERİZASYONLARI

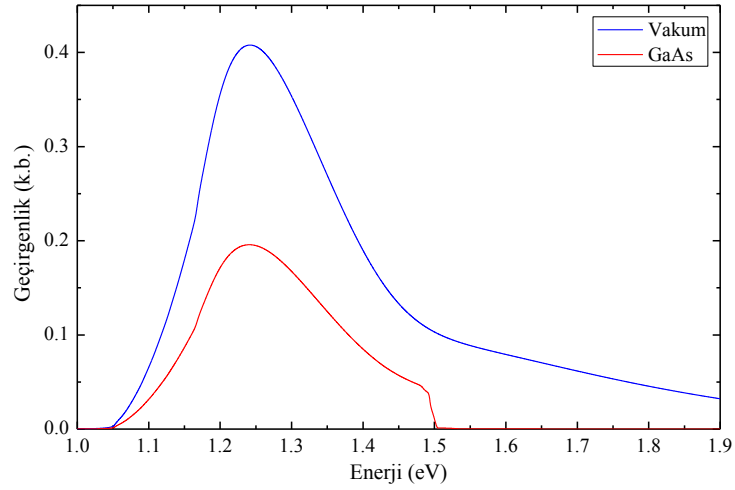
Kuantum kuyu içinde sınırlandırılmış safsızlık atomlarının Hidrojenik enerji seviyeleri üzerinden THz algılama yapılabilmesi delta katkılamının doğru gerçekleştirilmesine bağlıdır. Bölüm 4’de delta katkılama için MBE sisteminde yapılan eniyileştirme çalışmaları ve sonuçları sunulmuştur. Belirlenen MBE delta katkılama parametreleri kullanılarak büyütülen çoklu kuantum kuyulu ve tınlaşım tünelleme diyot yapılar için yapılan optik ve elektriksel ölçüm ve analiz sonuçları Bölüm 5’te delta katkılamının başarımı kapsamında tartışılmıştır. Bu bölümde, detayları Tablo 6.1’de verilen delta katkılı çoklu kuantum kuyulu örnekler için uzak kızılötesi bölgede yapılan soğurma ve bu örneklerden aygıt haline getirilenler için yapılan fototepki ölçümlerinin sonuçları sunulmuştur. Bu tez çalışması boyunca aktif olarak kullanılan optik karakterizasyon sistemlerinin sınırları dâhilinde THz bölgede yapılan bu ölçümlerde safsızlık seviyeleri üzerinden algılamaya dair net bir bilgi elde edilememiştir. Buna rağmen Almanya’daki Ion Beam Physics and Materials Research enstitüsünde Dr. Harald Schneider’a gönderilen örneklerin soğurma ölçüm sonuçlarında safsızlık seviyeleri üzerinden soğurma gözlemlenmiştir.

Tablo 6.1 Katkısız referans, Si ve Be delta katkılı çoklu kuantum kuyu örneklerinin MBE büyütme parametreleri

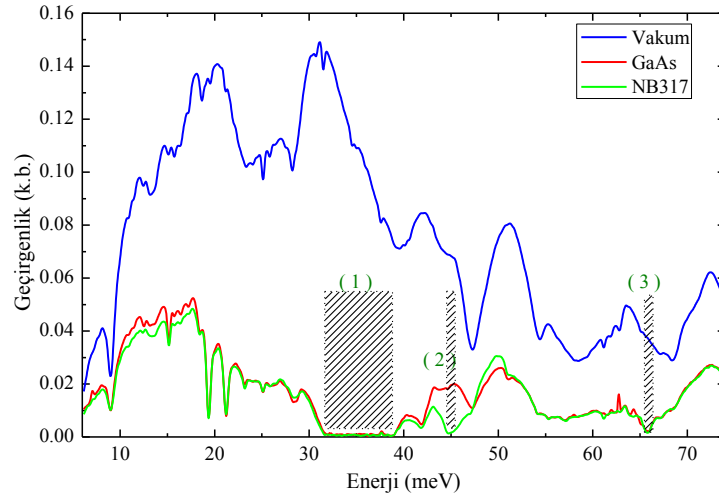
Örnek Kodu	δ -Katkı Miktarı (cm^{-2})	Kuyu Genişliği (nm)	Al alaşım Yüzdesi (%)	Tekrar
NB317	Yok	5	33	50
NB318	Si: 3×10^{10}	5	33	50
NB319	Si: 3×10^{11}	5	33	50
NB371	Be: 2×10^{10}	6	33	50
NB372	Be: 6×10^{10}	6	33	50
NB506	Yok	7,2	30	50
NB507	Si: 3×10^{10}	7,2	30	50
NB511	Be: 3×10^{10}	7,2	30	50
NB559	Si: 3×10^{10}	7,2	30	150
NB569	Be: 3×10^{10}	6,2	30	150
NB570	Be: 3×10^{10}	6.2	30	150

6.1. Delta Katkılı Çoklu Kuantum Kuyu Yapıların THz Soğurma Spektrumu Ölçümleri

Uzak kızılötesi bölgede yapılan soğurma ölçümleri safsızlık atomlarının enerji seviyeleri hakkında doğrudan bilgi vermektedir. Ancak elektromanyetik spektrumun bu bölgesinde atmosferik soğurmalar çok fazladır. Ayrıca kullanılan FT-IR sisteminde bu bölgede çalışan dedektörün hassasiyetinin düşük ve ışık kaynağının zayıf olması soğurma ölçümlerinin vakum altında yapılmasını gerekli kılmıştır. Bunlara ek olarak safsızlık atomlarının ölçümler sırasında iyonlaşmalarını önlemek amacıyla ölçümlerin mümkün olduğunca düşük sıcaklıkta yapılması gerekmiştir. Bu durumlar göz önünde bulundurularak, örneklerin uygun optik geçirgen pencerelerin kullanıldığı kapalı devre He kreostatı içinde 6K sıcaklığa soğutularak ve kreostat ile bütünleşik halde kullanılan FT-IR sisteminde vakum altında geçirgenlik ölçümleri yapılmıştır. Şekil 6.1’de görünür bölgede bu ölçüm sisteminde GaAs alttaş ve boşluk için alınan geçirgenlik spektrumu verilmiştir. Boşluk için yapılan ölçümler ışık yine kreostat içinden boş olan tutucudan geçirilerek GaAs alttaş ile aynı şartlarla alınmıştır. FIR bölgedeki ölçümlerde FT-IR sisteminde Globalar ışık kaynağı, Mylar multilayer ışın bölücü (beamsplitter) ve DLaTGS (D201) dedektör kombinasyonu kullanılmıştır. Şekil 6.2’de FIR (far infrared) bölgede boşluk, GaAs alttaş ve NB317 kod numaralı delta katkısız çoklu kuantum kuyu örneği için yapılan geçirgenlik ölçümlerinden elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’deki spektrumlar kıyaslandığında FIR bölgede kullanılan slit açıklığının 6 mm çapta olmasına rağmen elde edilen spektrum şiddetinin çok düşük ve gürültülü olduğu görülmektedir. Si ve Be malzemeleri için sırasıyla $\sim 10\text{meV}$ ve $\sim 22\text{meV}$ bölgelerinde soğurma beklenmektedir ve Şekil 6.2’deki boşluk ölçümlerinde 30 meV altındaki bölgeler çok gürültülüdür. Bu bölgede kullanılan ışık kaynağı ve dedektörün yeterince hassas/duyarlı olmamasıyla birlikte kapalı devre kreostat sisteminin FT-IR sistemiyle bütünleştirilmesi sonucu titreşimin artması da bu sonucu doğurmaktadır.



Şekil 6.1 6 K sıcaklıkta elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinde Tungsten ışık kaynağı, CaF_2 ışın bölücü, RT-Si Diode (Si D510) dedektör, kreostat için KRS-5 pencereler ve 4mm açıklık kullanılarak atmosfer ve GaAs alttaş için elde edilen geçirgenlik spektrumu

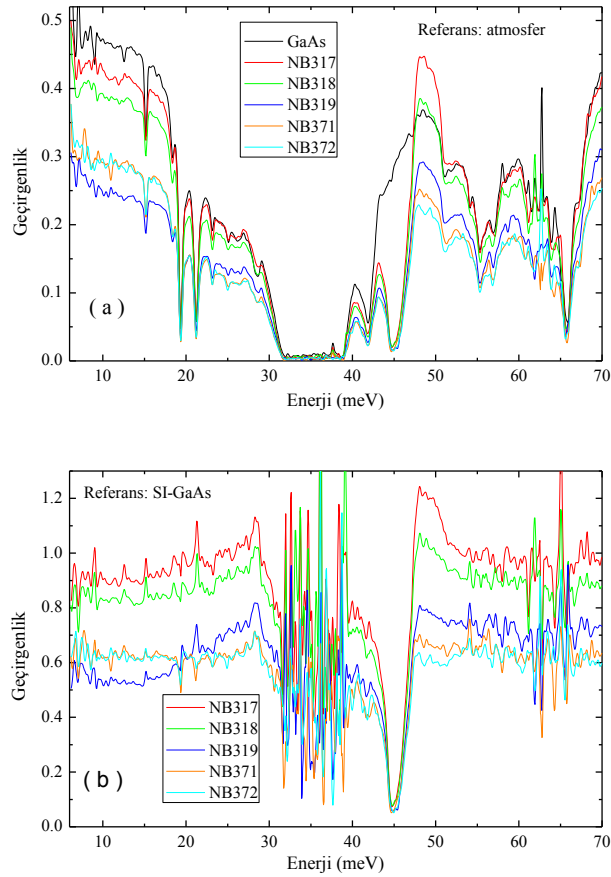


Şekil 6.2 6 K sıcaklıkta elektromanyetik spektrumun FIR bölgesinde Global ışık kaynağı, CaF_2 (VIS/NIR T401) ışın bölücü, RT-DTGS FIR (PE/DLaTGS D201) dedektör, kreostat için Polietilen pencereler ve 6mm açıklık kullanılarak atmosfer, GaAs alttaş ve NB317 kod numaralı örnek için elde edilen geçirgenlik spektrumu

Şekil 6.2'deki geçirgenlik spektrumlarında (1) ile gösterilen gri bölge (~32 – 38 meV bölgesi) GaAs için LO ve TO fonon soğurma enerjilerine ve (3) ile gösterilen gri bölge (~66 meV bölgesi) ise $2x\text{GaAs}$ fonon soğurma enerjilerine karşılık gelmektedir.

NB317 kod numaralı örnek için (2) ile gösterilen gri bölge (~ 45 meV'da görünen keskin düşme) engel tabakası olarak kullanılan AlGaAs'dan kaynaklı AlAs benzeri LO ve TO fonon soğurma enerjilerine karşılık gelmektedir [70].

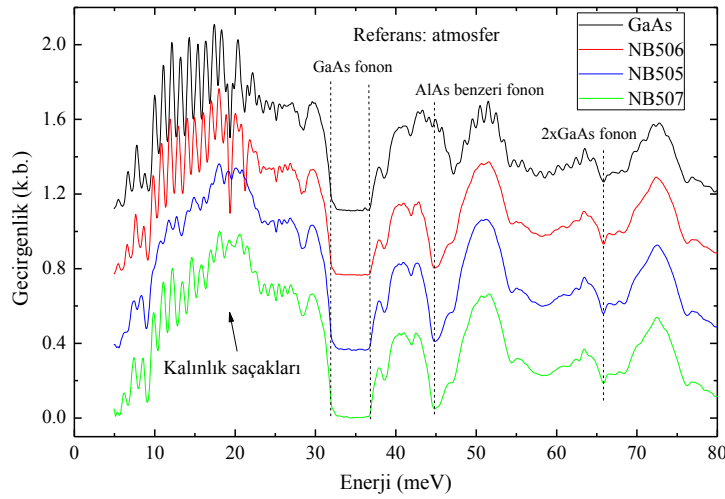
Yapılan soğurma ölçümlerinde delta katkılı çoklu kuantum kuyu örnekleri için referans olarak GaAs ve aynı özelliklerdeki delta katkısız çoklu kuantum kuyu örnekleri kullanılmıştır. Sonuçları kıyaslanan örnekler aynı koşullarda birlikte ölçülmüştür.



Şekil 6.3 Si ve Be delta katkılı çoklu kuantum kuyu örnekler için düşük sıcaklık (~ 6 K) geçirgenlik ölçümleri. Arkaplan referans olarak atmosfer (a) ve yarı-yalıtkan GaAs alttaş (b) kullanılmıştır

MBE büyütme parametreleri Tablo 6.1'de verilen NB317 kod numaralı delta katkısız referans örneği ile birlikte Si (NB318 ve NB319) ve Be (NB371 ve NB372) delta katkılı örnekler kreostat içinde 6K sıcaklıkta ölçülmüş ve sonuçlar Şekil 6.3'de verilmiştir. Ölçümler, hem atmosfer hem de yarı-yalıtkan GaAs alttaş arkaplan referans

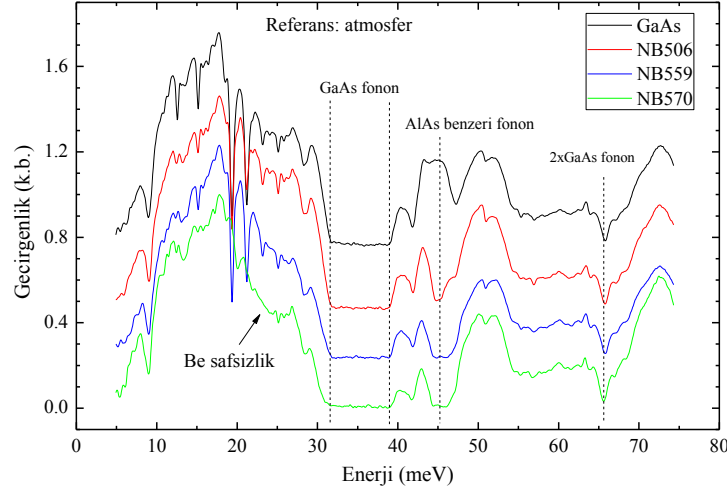
olacak şekilde gösterilmiştir. Şekil 6.3 (b)'de arkaplan olarak kullanılan GaAs'ın ve çoklu kuantum kuyu örneklerin GaAs fonon bölgesinde (~32 - 38 meV) geçirgenlik sıfıra yaklaştığından bölme işleminin sonucunda gürültü artmıştır. Ölçümü yapılan NB317 referans örneği ve artan miktarda Si katkılı NB318 ($3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$) ve NB319 ($3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$) kod numaralı örneklerin spektrumları karşılaştırıldığında, geçirgenliklerin katkı miktarı arttıkça azaldığı görülmektedir. Ancak Si safsızlık atomları için ~10 meV ve Be safsızlık atomları için ~22 meV olan bağlanma enerjilerine dair net yorum yapabilecek kadar keskin karakterler görülememiştir.



Şekil 6.4 İnceltmiş çoklu kuantum kuyu ve referans örneklerinin düşük sıcaklıkta FIR bölgesinde alınan geçirgenlik ölçüm sonuçları

Soğurma ölçümlerinde safsızlık seviyelerinden kaynaklanan etkiyi baskınlaştırmak ve GaAs alttaşın etkisini azaltmak amacıyla örnekler mekanik yollarla inceltilmiştir. PL ölçüm sonuçlarında safsızlık seviyelerinin daha belirgin olduğu 50 tekrarlı yapıya sahip NB505 (Be katkılı) ve NB507 (Si katkılı) delta katkılı örnekler ve referans olarak kullanılacak katkısız NB506 ve GaAs alttaş örnekleri, mekanik yollarla 600 μm kalınlıktan yaklaşık 150 μm kalınlığa kadar inceltilmiş ve parlatılmıştır. Bu örnek grubu için yapılan düşük sıcaklık FIR bölge geçirgenlik ölçüm sonuçları Şekil 6.4'te sunulmuştur. Ancak bu örnekler için elde edilen geçirgenlik spektrumunun genelinde ve özellikle de düşük enerji bölgesinde (10-30 meV) saçaklar gözlemlenmiştir. İnceltilmiş örneklerin iki yüzeyi arasında oluşan Fabry-Perot kalınlık saçakları bu örneklerin geçirgenlik spektrumlarını bir birleriyle kıyaslanamaz hale

getirmiştir. Oldukça zayıf karakterli olan safsızlık atomlarının bağlanma enerjileri ve dolayısıyla soğurma ölçümlerinde görülmesi beklenen bölge bu saçakların yoğun olarak görüldüğü yere karşılık geldiğinden herhangi net bir soğurma tespit edilememiştir.

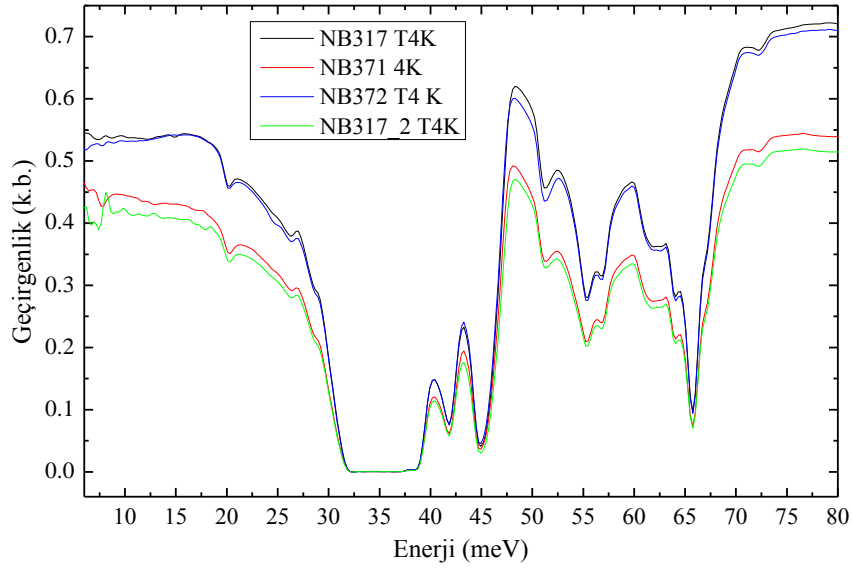


Şekil 6.5 *Tekrar sayısı arttırılmış çoklu kuantum kuyu ve referans örneklerinin düşük sıcaklıkta FIR bölgede alınan geçirgenlik ölçüm sonuçları*

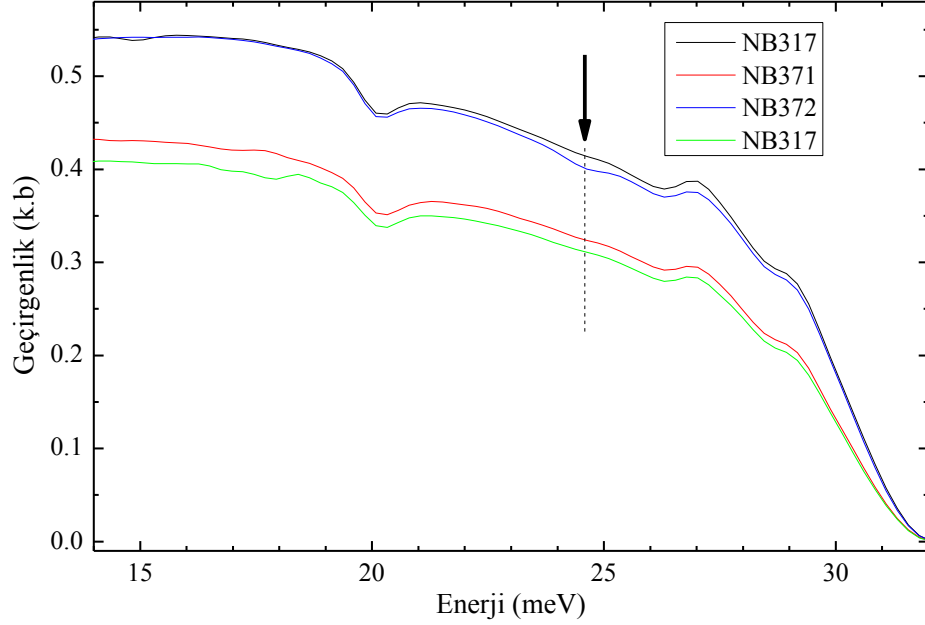
Tekrar sayıları arttırılarak (150 tekrar) katkı atomlarından gelecek etkinin baskınlaştırılması amaçlanan Si katkılı NB559 ve Be katkılı NB570 kod numaralı örneklerin düşük sıcaklık FIR bölge geçirgenlik ölçüm sonuçları Şekil 6.5'te gösterilmiştir. Si safsızlık atomlarının bağlanma enerjilerinin (~10 meV) karşılık geldiği bölge DLaTGS dedektörünün ölçüm sınırına (~2 meV) çok yakındır. Bu nedenle ölçümdeki gürültü seviyesinin görece olarak daha fazla olduğu yere denk geldiğinden, net bir soğurma karakteri gözlenememiştir. Ancak, NB570 numaralı örneğin spektrumunda ~24 meV bölgesinde Be safsızlık atomlarından kaynaklandığı düşünülen soğurma bölgesi kısmen gözlemlenmiştir.

Soğurma ölçümleri için kullanılan bu ölçüm sistemi çok zayıf karakterli olan katkı atomlarının etkisinin görülmesini oldukça zorlaştırmıştır. Bu nedenle, büyütme detayları Tablo 6.1'de verilen Si ve Be katkılı bir grup örnek (NB317, NB318, NB319, NB371, NB372) daha hassas soğurma ölçümlerinin yapılması için Dresden, Almanya'daki Ion Beam Physics and Materials Research enstitüsünde Dr. Harald Schneider'a

gönderilmiştir. Sürekli akışkanlı He kreostat ve Bolometre kullanılarak yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçlar Şekil 6.6 ve Şekil 6.7’de sunulmuştur. Yapılan ölçümlerde, yüksek seviyede Be katkılı NB372 kod numaralı örnekte 24,7 meV enerji seviyesinde (Şekil 6.7’de siyah ok ile gösterilen bölge) fark edilir bir soğurma sinyali elde edilmiştir. Ancak daha düşük seviyede Be katkılı olan NB371 kod numaralı örnekte net bir sinyal gözlemlenememiştir. Benzer şekilde Si katkılı örneklerde safsızlık bağlanma enerjisine karşılık gelen bölgede tanımlanabilen bir soğurma gözlemlenemediğinden sonuçları burada verilmemiştir.



Şekil 6.6 *Almanya-Dresden’de Ion Beam Physics and Materials Research enstitüsünde Be katkılı örneklerle yapılan düşük sıcaklık geçirgenlik ölçüm sonuçları*

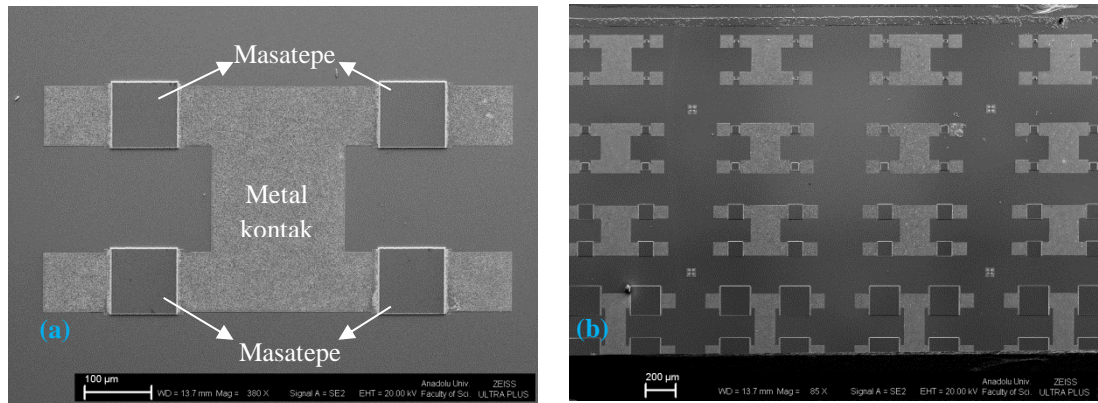


Şekil 6.7 Şekil 6.6'de verilen grafiklerin 14-32 meV bölgesinin büyütülmüş hali

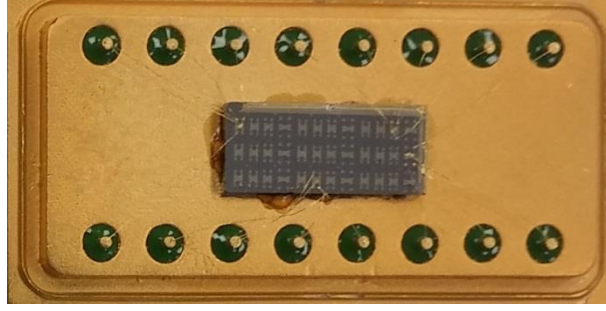
6.2. Delta Katkılı Çoklu Kuantum Kuyu Aygıtların Karanlık Akım, Fotoakım ve Fototepki Ölçümleri

Büyütülen ve kuyu merkezleri δ -katkılı çoklu kuantum kuyu yapılar THz algılama için kullanılacak temel yapılardır. THz frekans bölgesinin enerjisi kuyu içindeki taşıyıcıları kuyu dışına çıkarmaya yetmeyeceğinden algılama yanal aygıt tasarımıyla yapılmıştır. Kuyu içindeki taşıyıcılar (elektronlar/boşluklar) tabakalara dik gelen THz ışık yardımıyla 1s benzeri enerji seviyesinden 2p benzeri uyarılmış enerji seviyesine çıkarılarak uygulanan elektrik alan yardımıyla kuyu boyunca taşınarak akıma katkı sağlayacaktır. Bu tasarımda elektronların akıma katkı sağlayabilmesi için masatepe yapının karşılıklı iki kenarının metal kaplanması gerekmektedir. Çoklu kuantum kuyu yapılar için Bölüm 3.3'de detayları verilmiş olan litografi işlemleri uygulanmıştır. Litografi işlemleri tamamlandıktan sonra örneklerin kontak bölgeleri metal kaplanmıştır. Si delta katkılı örnekler için Ni (25nm) / Ge (36nm) / Au (100nm) metal katmanlarından oluşan n-tipi metal kaplama reçetesi uygulanmıştır. Be delta katkılı örnekler için ise Cr (30nm) / Au (250nm) metal katmanlarından oluşan p-tipi metal kaplama reçetesi uygulanmıştır. Masatepe yapıların yan yüzlerinin tam olarak metal

kaplanabilmesi için metal kaplama sisteminde her katmanın yarı kalınlığına ulaşılan kadar -5° açıyla ve diğer yarı kalınlığı boyunca $+5^\circ$ açıyla konumlandırılmışlardır. Metal kaplanan n-tipi örnekler RTP sisteminde 425°C sıcaklıkta tavlarken p-tipi metal kaplı olan örnekler için tavlama işlemi uygulanmamıştır. Yanal aygıt olarak üretilen örneklerden birinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü örnek olarak Şekil 6.8’de verilmiştir. Şekil 6.8 (a)’da $104 \times 104 \mu\text{m}^2$ boyutlarındaki dört masatepenin görüntüsü sunulmuştur; açık gri alanlar metal kaplı bölgelerdir. Şekil 6.8 (b) ise masatepe boyutları $24 \times 24 \mu\text{m}^2$, $54 \times 54 \mu\text{m}^2$, $104 \times 104 \mu\text{m}^2$ ve $204 \times 204 \mu\text{m}^2$ olan aygıtların toplu olarak görüntüsü verilmiştir. Şekil 6.9’da I-V ve fototepki ölçümlerinde kullanılmak üzere taşıyıcı pakete sabitlenen aygıtların metal bölgelerinden pinlere $25 \mu\text{m}$ kalınlığındaki altın tel ile bağlantısı yapılan aygıtların fotoğrafı verilmiştir. Her bir dörtlü masatepe topluluğu için orta noktalarındaki kontak bölgesinden karşı bağlantı yapılmıştır. Ölçüme hazır hale getirilen her bir örnek için sıvı azot ortamında (80K) karanlık akım ölçümleri yapılmış ve çalışan aygıtlar belirlenerek kreostat içinde 6K sıcaklıkta karanlık akım ve üzerlerine NIR ve MIR ışıklar düşürülerek fotoakım ölçümleri yapılmıştır.

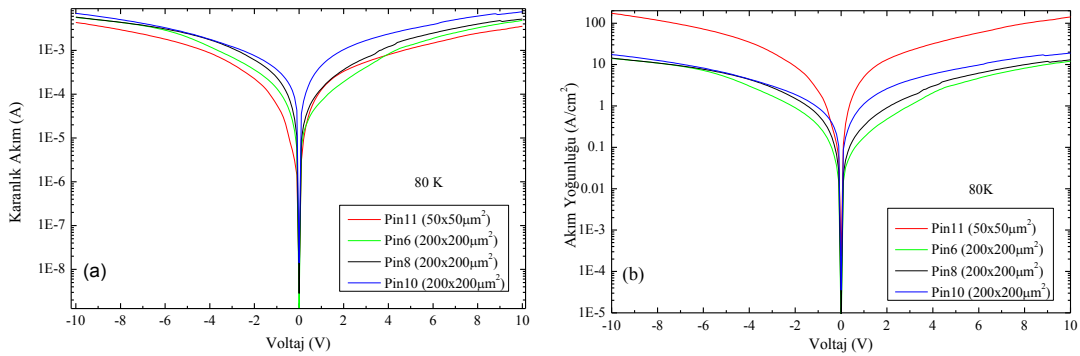


Şekil 6.8 Tel bağlama işlemine hazır hale getirilen yanal aygıt masatepe yapılarının birinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri. Boyutları $104 \times 104 \mu\text{m}^2$ olana dört adet masatepe (a) ve farklı boyutlara sahip masatepelerin (b) SEM görüntüleri



Şekil 6.9 Taşıyıcı paket üzerine sabitlenmiş aygıtların $25 \mu\text{m}$ kalınlığındaki Au tellerle kontak bölgelerinden taşıyıcı paket pinlerine bağlantısı yapılmış farklı masatepe boyutlarındaki aygıtların fotoğrafı

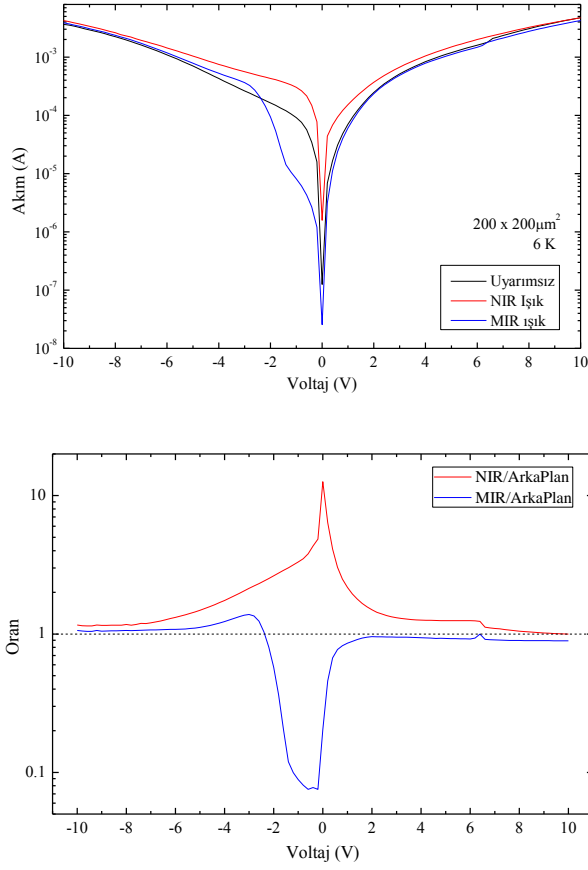
Aygıt haline getirilen örneklerin ışık düşürülmeden (uyarımsız), NIR ve MIR ışık altında fotoakım ölçümleri yapılmıştır ve bu ölçümlerde sinyal değişimleri gözlemlenmiş olmasıyla birlikte FIR bölgede yapılan fototepki ölçümlerinde safsızlık seviyelerinden kaynaklanan herhangi bir sinyal tespit edilememiştir. Ancak görünür bölgede NIR ışık altında yapılan fototepki ölçümlerinde kuantum kuyu temel enerji seviyelerine karşılık gelen bölgelerde sinyal değişimleri gözlemlenmiş. Bu ölçümler yardımıyla ölçüm düzeneğinin ve aygıtların çalıştığı sonucuna ulaşılmıştır. PL ölçüm sonuçlarından safsızlık seviyeleri belirgin olarak gözlemlenen delta katkılı çoklu kuantum örnekleri aygıt haline getirilerek üzerine ışık düşürülmeden, fotoakım ve fototepki ölçümleri yapılmıştır. Burada sadece NB319 (Si), NB372 (Be), NB569 (Be) ve NB570 (Be) kod numaralı örneklerin ölçüm sonuçları örnek olarak sunulmuştur.



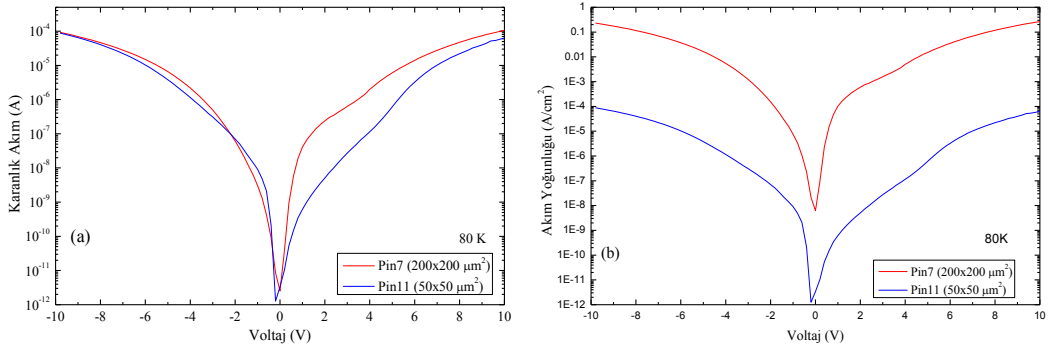
Şekil 6.10 NB319 kod numaralı örneğinin farklı masatepe boyutlarındaki aygıtlarından 80 K sıcaklıkta alınan karanlık akım (a) ve akım yoğunluğu (b) ölçüm sonuçları

Yüksek konsantrasyonlu Si delta katkılı NB319 kod numaralı örneği aygıt haline getirilerek sonuçları Şekil 6.10'da sunulan 80K karanlık akım-voltaj ölçümleri yapılmıştır. Şekil 6.10 (a)'da 80K I-V ölçüm sonuçları ve (b)'de mesaboyutları hesaba katılarak elde edilen akım yoğunluğu (A/cm^2) sonuçları sunulmuştur.

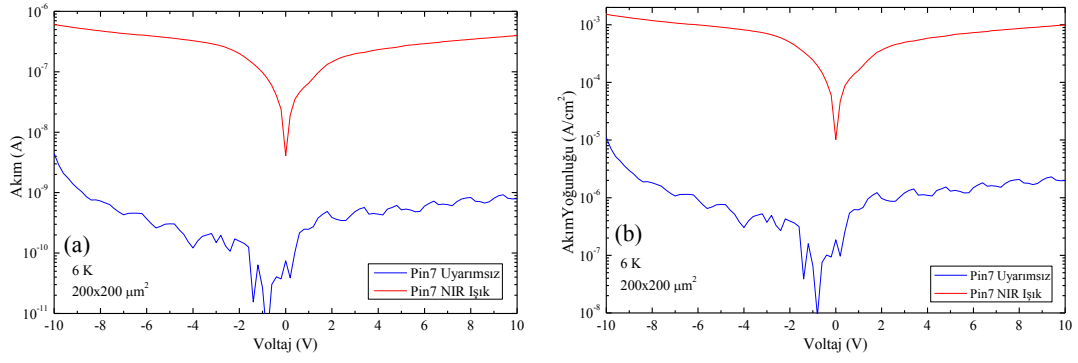
NB319 kod numaralı örnek için 6K düşük sıcaklık I-V ölçümleri, üzerine ışık düşürülmeden ve üzerine NIR ve MIR dalgaboylarında ışık düşürülerek yapılmıştır. Şekil 6.11 (a)'da verilen ölçüm sonuçlarında düşük voltaj bölgelerinde net bir fotoakım gözlenmektedir. Gözlenen fotoakım, aydınlatma dalgaboyuna göre farklı davranışlar sergilemektedir: NIR ışık altında yapıdan geçen toplam akımda artma olurken, MIR aydınlatma sonrasında akımda azalma gözlenmektedir. Bu durumun daha net görülebilmesi için aydınlatma yapılırken okunan akım değerlerinin, aydınlatma olmadan okunan akım değerlerine oranlarını hesaplanmış ve Şekil 6.11 (a)'da gösterilmiştir. Bu davranış, yapı içinde farklı tipte taşıyıcıların aktif hale geldiği ve/veya baskın taşıyıcıların tuzaklandığı şeklinde yorumlanmıştır. NIR aydınlatma altında, gelen ışığın yüksek enerjisi nedeniyle elektron-boşluk çiftleri oluşabilmekte ve akıma katkı sağlayabilmektedirler. Ancak MIR aydınlatma altında, gelen ışığın enerjisi bantlar arasında geçiş yaratacak kadar yüksek olmadığından sadece tek bant içindeki taşıyıcı tipiyle etkileşebilecektir. Bu durum, normal şartlar altında akıma katkı sağlayan taşıyıcıların tuzaklanmasına veya azınlık taşıyıcılarından kaynaklanan ters yöndeki akımın artmasına sebep olabileceği şeklinde değerlendirilmiştir. Şekil 6.11 (b)'de görünen -2 V'tan daha büyük voltaj değerlerindeki davranış düşünüldüğünde de; uygulanan yüksek voltajlarda tuzaklarda tutulan taşıyıcıların yüksek elektrik alan etkisiyle serbest hale geldikleri ve akıma aynı yönde katkı sağladıkları şeklinde yorumlanmıştır. NB319 kod numaralı örneği için FIR bölgede yapılan fototepki ölçümünde herhangi kayda değer bir sinyal görülememiştir.



Şekil 6.11 NB319 kod numaralı örneğinin $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ boyutlarındaki masatepeden 6 K sıcaklıkta ışık kaynağı olmadan, NIR ve MIR ışık altında alınan akım-voltaj ölçümleri (a). Aydınlatılmış koşullarda elde edilen akım değerlerinin aydınlatılmamış akım değerlerine oranı (b)



Şekil 6.12 NB372 kod numaralı örneğinin farklı masatepe boyutlarındaki aygıtlardan 80 K sıcaklıkta alınan karanlık akım (a) ve akım yoğunluğu (b) ölçüm sonuçları

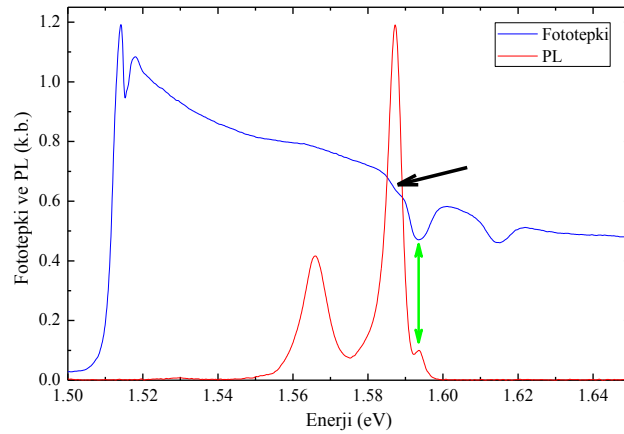


Şekil 6.13 NB372 kod numaralı Be katkılı örneğin $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ boyutlarındaki mastepeden 6 K sıcaklıkta ışık kaynağı olmadan ve NIR ışık altında alınan akım-voltaj ölçüm sonuçları. Akım-voltaj (sol), akım yoğunluğu-voltaj (sağ)

Şekil 6.12’de NB372 kod numaralı Be katkılı p-tipi çoklu kuantum kuyu örneği için farklı mastepe boyutlarındaki aygıtlardan 80 K sıcaklıkta alınan karanlık akım (a) ve akım yoğunluğu (b) grafikleri sunulmuştur. Şekil 6.13’te ise $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ masatepe boyutlarındaki aygıtından düşük sıcaklıkta alınan I-V ölçümleri gösterilmektedir: NIR ışık altında okunabilir bir akım gözlenirken, ışık kaynağı kapatılarak yapılan ölçümlerde yapıdan çok düşük düzeyde akım geçtiği gözlenmektedir. Bu durum Şekil 6.11’de ölçüm sonuçları verilen NB319 kod numaralı Si delta katkılı çoklu kuantum kuyu ile kıyaslandığında anlamlıdır: Yapı içindeki aktif taşıyıcıların etkin kütlelerinin farklarının yanında GaAs malzemesi içinde Si katkı atomlarının iyonlaşma enerjisi 5,8 meV iken Be katkı atomlarının iyonlaşma enerjisi 28 meV’dir. Ayrıca, kuantum kuyu içinde sınırlandırılan safsızlık atomlarının bağlanma enerjileri bu değerlerden daha büyüktür. Düşük sıcaklıkta Be katkı atomlarının iyonlaşıp sisteme taşıyıcı vermeleri Si katkı atomlarına kıyasla daha zordur. Ancak Şekil 6.13’te görüldüğü gibi Be delta katkılı çoklu kuantum kuyu aygıt üzerine yüksek enerjili NIR ışık düşürüldüğünde akım yoğunluğu iki merteye yükselmektedir. NIR ışık yardımıyla voltaj altında iyonlaşan taşıyıcılar akımı arttırmaktadır.

FIR bölgede yapılan fototepki ölçümlerinden herhangi bir sinyal gözlemlenememiş olmasına rağmen görünür bölgede NIR ışık kaynağıyla uyarılarak yapılan fototepki ölçümleri Şekil 6.14’te sunulmuştur. NB372 kod numaralı Be delta katkılı örneği için ayrıca bu grafikte daha önce düşük sıcaklıkta alınan fotoluminesans (PL) ölçüm sonuçlarıyla görünür bölge fototepki ölçüm sonuçları Şekil 6.14’te

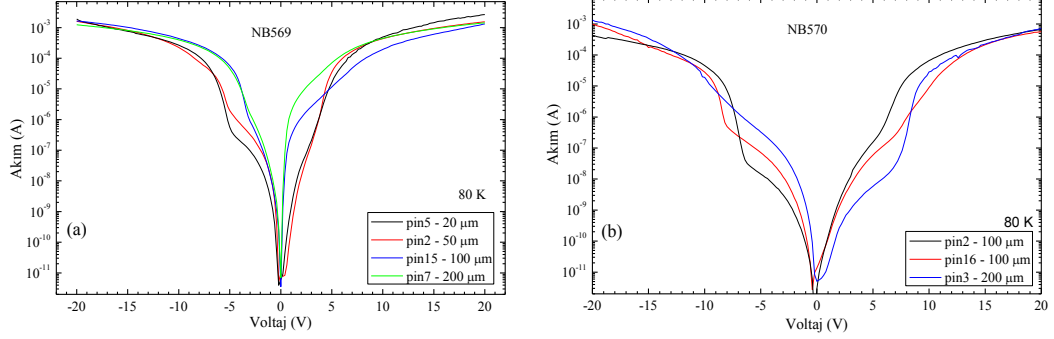
kıyaslamalı olarak sunulmuştur. Bu kıyaslamayla, düşük sıcaklıklarda PL ölçümlerinde gözlemlenemeyen $E_1 \rightarrow LH_1$ geçişleri görünür bölge fototepki ölçümlerinde gözlenebilmektedir. Şekil 6.14’de yeşil ok ile gösterilen bölge $E_1 \rightarrow HH_1$ (1,594 eV) geçişlerine karşılık gelmektedir. 1,615 eV enerji değerine karşılık gelen bölgedeki düşüş $E_1 \rightarrow LH_1$ geçişine karşılık gelmektedir. Aradaki ~21 meV fark ise bu örnek için yapılan hesaplamalarla uyumludur. Şekil 6.14’de $2p \rightarrow LH_1$ geçişine karşılık gelen siyah okla gösterilen bölge belirginleşmektedir.



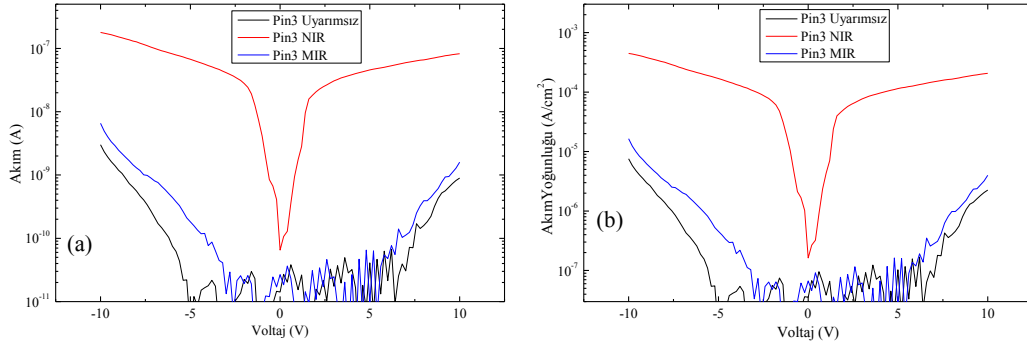
Şekil 6.14 NB372 kod numaralı örnekleri için yapılan $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ masatepe boyutlu aygıtlar üzerinden görünür bölgede yapılan fototepki ölçümleri ile düşük sıcaklık PL ölçüm sonuçlarının karşılaştırması verilmiştir

Be katkılı NB569 kod numaralı 50 tekrarlı süperörgü ve NB570 kod numaralı 150 tekrar çoklu kuantum kuyu örneklerinden yanal aygıt fabrikasyonları yapıldıktan sonra farklı büyüklükteki diyotlardan optoelektronik karakterizasyonları yapılmıştır. Yapıların 80 K sıcaklıktaki karanlık akım-voltaj davranışları Şekil 6.15’te verilmiştir. Genel olarak benzer davranış sergileyen örneklerden engel genişliği ve tekrar sayısı daha fazla olan NB570 kod numaralı örnekteki akım seviyelerinin biraz daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bu iki örnek için de fototepki ölçümleri yapılmış ancak ölçümlerdeki gürültü seviyesinden ayrıştırılabilir bir sinyal görülememiştir. NB570 kod numaralı örneği için uyarımsız, NIR ve MIR ışık kullanılarak yapılan fotoakım ölçümleri Şekil 6.16 (a)’da ve akım yoğunluğu sonuçları (b)’de sunulmuştur. Bu örnek de diğer

örneklerde olduğu gibi NIR ışığa belirgin tepki verirken MIR ışığa çok az tepki vermektedir.



Şekil 6.15 Be delta katkılı NB569 kod numaralı süperörgü yapı (a) ile NB570 kod numaralı çoklu kuantum kuyu (b) yapılarından elde edilen aygıtların karanlık akım-voltaj karakteristikleri



Şekil 6.16 NB570 kod numaralı Be katkılı örneğin $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ boyutlarındaki mastepeden 6 K sıcaklıkta ışık kaynağı olmadan, MIR ve NIR ışık altında alınan akım-voltaj ölçüm sonuçları. Akım-voltaj (a), akım yoğunluğu-voltaj (b)

7. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, kuantum kuyu içinde sınırlandırılan safsızlık (Si, Be) atomlarının Hidrojenik ($1s$, $2p_{\pm}$ gibi) enerji seviyeleri kullanılarak THz algılayıcı yapıların üretim ve karakterizasyonlarının yapılması hedeflenmiştir. Bu algılayıcı çoklu kuantum kuyu yapıların MBE sistemiyle büyütülmesi ve delta katkılanması, çıplak örnekler ve aygıt haline getirilen örnekler üzerinden optoelektronik karakterizasyonlar çalışmanın temel basamakları olarak tanımlanmıştır. Uygulamaya yönelik THz algılayıcıların tez kapsamında önerilen yaklaşımla gerçekleştirilebilmesi, özellikle delta katkılamasının başarılması ve sonrasında FIR bölgede yapılacak karakterizasyonlar sonrasında mümkündür.

MBE sisteminde çoklu kuantum kuyuların kristal ve optik olarak yüksek kalitede büyütülmesi ilk aşamada çalışılmıştır. Büyütülen örnekler için HRXRD ve spektroskopik elipsometre ölçüm sistemlerinde yapısal ve PL ölçüm sisteminde optik karakterizasyonlar yapılmıştır. Eniyileştirilmiş MBE büyütme parametreleri belirlendikten sonra bu bilgiler kullanılarak delta katkılama çalışmaları çoklu kuantum kuyu ve çift engel tınlaşım tünelleme örnekler üzerinden çalışılmıştır. Çoklu kuantum kuyu örnekler üzerinden delta katkılamasının daha iyileştirilmesi amacıyla büyütme sıcaklığı, V-grubu malzemesi için dimer (As_2) ve tetramer (As_4) molekül yapısının ve sonuçları tezde verilmemekle birlikte V-grubu malzemesinin fazladan akısının delta katkılama üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla grup örnekler MBE sisteminde büyütülüp PL ölçümleri üzerinden karakterize edilmiştir. Bu sonuçlardan elde edilen en iyi parametreler kullanılarak kuantum kuyu içinde sınırlandırılan safsızlık atomlarının temel özelliklerini ortaya çıkaracak grup örnekler büyütülmüştür. Bu kapsamda Si, Be ve Te katkı malzemeleri kullanılarak oluşturulan kuantum kuyu genişliği 7,2 nm olan çoklu kuantum kuyu örnek grupları oluşturulmuştur. Kuantum kuyu içinde sınırlandırılan safsızlık atomları için $1s/2p_{\pm}$ bağlanma enerjileri sırasıyla Si için 12,7 meV/3,3 meV, Be için 27,0/5,2 meV ve Te için 18,4/6,4 meV olarak belirlenmiştir. Özellikle Si için $1s$ bağlanma enerjisi yapılan kuramsal hesaplamalarla uyumluysen $2p_{\pm}$ bant benzeri uyarılmış enerji seviyesi için kuramsal hesaplamalarda $\sim 2,3$ meV değeri elde edilirken ölçüm sonuçlarında $\sim 3,3$ meV elde edilmiştir. Bu durumun düşük lazer uyarımı altında yapılan PL ölçümlerinin hata payı içinde kaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Yine bu örnek grubuna ek olarak Si ve Be delta katkılı örneklerde kuyu merkezleri

($z=0,0$) delta katkılı örnekler referans olarak kullanılacak şekilde delta katkılamanın kuyu kenarına doğru ($z=0,3$) yapıldığı örnek grubu büyütülmüştür. Bu iki grup örnek için yapılan düşük sıcaklık PL ölçümlerinden kuramsal olarak beklendiği gibi kuyu kenarına doğru delta katkılama yapılan örneklerde safsızlık atomlarının Hidrojenik bağlanma enerjileri daha $1s$ ve $2p_{\pm}$ seviyeleri için orantılı olacak şekilde daha küçük çıkmıştır. Çift engel tınlaşım tünelleme yapı içinde Si ve Be katkı atomları kullanılarak benzer grup örnekler oluşturularak karanlık akım ve voltaj bağımlı ölçümler yapılmıştır. Be delta katkılı çift engel tınlaşım tünelleme örneklerinde değerlik bandının karmaşık yapısından dolayı seçilen dar kuantum kuyuları nedeniyle tünelleme geçişleri yüksek akım bölgesine kaymış ve bu nedenle safsızlık seviyeleri üzerinden tünelleme net olarak gözlemlenememiştir. Ancak Si delta katkılı örnek grubu için yapılan karanlık akım ölçümlerinden safsızlık seviyeleri üzerinden gerçekleşen tünellemeler tanımlanabilmiş ve kuramsal olarak beklenen özellikleri sergiledikleri sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca Si delta katkılı bu örnekler için voltaj bağımlı PL ölçümleri yapılarak $2p_{\pm}$ bağlanma enerjileri elde edilmiş ve bu sonuçlar karanlık akım sonuçlarıyla uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca Si delta katkılı çift engel tınlaşım tünelleme örnekleri için manyetik alan altında karanlık akım ölçümleri yapılarak safsızlık atomlarının bağlanma enerjilerinin manyetik alanla değişimi gösterilmiştir.

MBE sisteminde delta katkılamanın başarılması sonrasında delta katkılı çoklu kuantum kuyu örnekleri için FT-IR sisteminde çıplak örnekler üzerinden soğurma ve yanal aygıt haline getirilen örnekler üzerinden de fotoakım ve fototepki ölçümleri yapılmıştır. Ancak FT-IR sisteminde kullanılan Global ışık kaynağının karakterizasyonların yapılacağı THz bölgede zayıf olması ve soğurma ölçümleri için kullanılan DLaTGS dedektörün hassasiyetinin düşük olması bu bölgede gürültü seviyesinin yüksek olmasına neden olmaktadır. Ayrıca bu yapıların düşük sıcaklıkta karakterize edilmesi gerektiğinden kapalı He akışına sahip kreostat FT-IR sistemiyle bütünleşik hale getirilmiş ve bu durumda gürültü seviyesini fazladan arttırmıştır. Bu nedenlerle bu bölgede yapılan soğurma ölçümlerinde safsızlık seviyelerinden kaynaklanan soğurmalar net olarak tanımlanamamıştır. Ancak Ion Beam Physics and Materials Research enstitüsünde kısıtlı sayıdaki örnek üzerinde titreşimsiz kreostat ve THz bölgede daha yüksek duyarlılığa sahip Bolometre ile yapılan soğurma ölçümlerinde Be safsızlık atomları için hidrojenik enerji seviyeleri üzerinden soğurma

açıkça gözlemlenmiştir. Yanal aygıt masatepe tasarımında masatepelerin karşılıklı yan kenarlarının metal kaplanması ile ilgili birçok sorun yaşanmış ancak yapılan çalışmalarla bu sorunlar aşıldığı yapılan karanlık akım ölçümleriyle gösterilmiştir. Si ve Be delta katkılı örneklerden hazırlanan aygıtlar için fototepki ölçümleri yapılmıştır. Ancak THz bölgede herhangi bir sinyal elde edilememiştir. Bununla birlikte görünür bölgede yapılan fototepki ölçümleri aygıtların çalıştığını göstermesi açısından sunulmuştur.

Sonuç olarak, kuantum kuyu içindeki safsızlık atomlarının bağlanma enerjilerinin THz algılayıcı sistemlerde aktif mekanizma olarak kullanılması önerisi yapılan bu tez çalışmasında; tasarlanan yapıların THz algılayıcı olarak çalıştıkları eldeki imkânların yetersizliği nedeniyle doğrudan gösterilememiş ancak yapıların uygulamadaki potansiyelleri dolaylı olarak gösterilmiştir.

KAYNAKÇA

- [1] Rogalski, A. (2011). *Infrared detectors*. (2. basım). ABD Newyork: CRC Press.
- [2] Rogalski, A. ve Sizov, F.(2011). Terahertz detectors and focal plane arrays. *Opto–Electron. Rev.*, 19 (3), 346-404.
- [3] Razeghi, M. (2010). *Technology of Quantum Devices*. New York: Springer.
- [4] Ferguson, B. ve Zhang, X. (2002). Materials for terahertz science and technology, *Nature Materials*, 1, 26 – 33.
- [5] Giorgetta, F. R., Baumann, E., Graf, M., Yang, Q., Manz, C., Köhler, K., Beere, H. E., Ritchie, D. A., Linfield, E., Davies, A. G., Fedoryshyn, Y., Jäckel, H., Fischer, M., Faist, J. ve Hofstetter, D. (2009). Quantum Cascade Detectors. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 45(8), 1039-1052.
- [6] Dupont, E., Fatholouloumi, S., Wasilewski, Z. R., Aers, G., Laframboise, S. R., Lindskog, M., Razavipour, S. G., Wacker, A., Ban, D. ve Liu, H. C. (2012). A phonon scattering assisted injection and extraction based terahertz quantum cascade laser, *Journal of Applied Physics*, 111(7), 073111-1 - 073111-10.
- [7] Seliuta, D., Kavaliauskas, J., Čechavičius, B., Balakauskas, S., Valušis, G., Sherliker, B., Halsall, M.P., Harrison, P., Lachab, M., Khanna, S. P. ve Linfield, E.H. (2008). Impurity bound-to-unbound terahertz sensors based on beryllium and silicon delta-doped GaAs/AlAs multiple quantum wells, *App. Phys. Lett.*, 92, (053503-1)- (053503-3).
- [8] Seliuta, D., Čechavičius, B., Kavaliauskas, J., Krivaite, G., Grigelionis, I., Balakauskas, S., Valušis, G., Sherliker, B., Halsall, M.P., Lachab, M., Khanna, S.P., Harrison, P. ve Linfield, E.H. (2008). Terahertz Detection with δ -Doped GaAs/AlAs Multiple Quantum Wells, *Acta Phys. Polonica. A*, 113, 909-912.
- [9] Lachab M., Khanna, S.P., Harrison, P., Linfield, E.H., Cerskus, A., Kundrotas, J., Seliuta, D. ve Valusis, G. (2010). MBE growth and transport properties of silicon delta-doped GaAs/AlAs quantum well structures for terahertz frequency detection, *Jour. Crys. Grow.*, 312, 1761-1765.
- [10] Beiser, A. (1987). *Concept of Modern Physics*. (Dördüncü Baskı). New York: McGraw-Hill Yayınları.
- [11] Gasiorowicz, S. (1974). *Quantum Physics*, ABD: Wiley.
- [12] Harrison, P. (2010). *Quantum Wells, Wires and Dots*. (Üçüncü Basım). İngiltere: Wiley.

- [13] Morkoç, H., Drummond, T.J., Kopp, W., ve Fischer, R. (1982). Influence of Substrate Temperature on the Morphology of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ Grown by Molecular Beam Epitaxy, *J. Electrochem. Soc.*, 129, 824-826.
- [14] Shen, J.H., Jiang, P. ve Xie, X.D. (1999). The difference between the surface reconstructions of $\text{AlAs}(001)$ and $\text{GaAs}(001)$. *Surface Review and Letters*, 6, 1167-1171.
- [15] Pakarinen, J., Polojarvi, V., Laukkanen, P., Tukiainen, A., Laakso, A., Peng, C.S., Tuomisto, P., Korpijarvi, V.M., Puustinen, J., Pessa, M. (2008). An effect of As flux on GaAs/AlAs quantum wells: A combined photoluminescence and reflection high-energy electron diffraction study. *Applied Surface Science*, 255, 2985-2988.
- [16] Vurgaftman, I. ve Meyer, J.R. (2001). Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys, *J. Appl. Phys.* 89, 5815-5875.
- [17] Pavesi, L. ve Guzzi, M. (1994). Photoluminescence of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ alloy. *J. Appl. Phys.*, 75, 4779-4842.
- [18] Bastard, G. (1981). Hydrogenic Impurity States in a Quantum Well: A Simple-Model, *Phys. Rev. B*, 24, 4714-4722.
- [19] Greene, R.L. ve Bajaj, K.K. (1983). Energy Levels of Hydrogenic Impurity states in $\text{GaAs-Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ Quantum Well Structures, *Solid State Commun.*, 45, 825-829.
- [20] Greene, R.L. ve Bajaj, K.K. (1985). Effect of Magnetic-Field on the Energy-Levels of a Hydrogenic Impurity Center in $\text{GaAs Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ Quantum-Well Structures, *Phys. Rev. B*, 31, 913-918.
- [21] Masselink, W.T., Chang, Y.C., ve Morkoç, H. (1983). Binding-Energies of Acceptors in $\text{GaAs-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ Quantum Wells, *Phys. Rev. B*, 28, 7373-7376.
- [22] Masselink, W.T., Chang Y.C., ve Morkoç, H. (1985). Acceptor Spectra of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As-GaAs}$ Quantum Wells in External Fields: Electric, Magnetic, and Uniaxial Stress, *Phys. Rev. B*, 32, 5190-5201.
- [23] Pasquarello, A., Andreani, L.C. ve Buczko, R. (1989). Binding-Energies of Excited Shallow Acceptor States in $\text{GaAs/Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ Quantum Wells, *Phys. Rev. B*, 40, 5602-5612.

- [24] Cheng, J.P. ve McCombe, B.D. (1990). Confinement Effects on the Low-Field-High-Field Correspondences of Hydrogenic Impurity States in Quasi-2-Dimensional Systems, *Phys. Rev. B* 42, 7626-7629.
- [25] Miller, R.C., Gossard, A.C., Tsang W.T. ve Munteanu, O. (1982). Extrinsic Photo-Luminescence from GaAs Quantum Wells, *Phys. Rev. B*, 25, 3871-3877.
- [26] Holtz, P.O., Zhao, Q.X., Ferreira, A.C., Monemar, B., Sundaram, M., Merz, J.L. ve Gossard, A.C. (1993). Excited-States of Shallow Acceptors Confined in GaAs/Al_xGa_{1-x}As Quantum-Wells, *Phys.Rev. B*, 48, 8872-8877.
- [27] Zheng, W.M., Halsall, M.P., Harmer, P., Harrison, P. ve Steer, M.J. (2002). Acceptor binding energy in delta-doped GaAs/AlAs multiple-quantum wells, *J. App. Phys.*, 92, 6039-6042.
- [28] Shanabrook, B.V., Comas, J., Perry, T.A. ve Merlin, R. (1984). Raman-Scattering from Electrons Bound to Shallow Donors in GaAs-Al_xGa_{1-x}As Quantum-Well Structures, *Phys. Rev. B*, 29, 7096-7098.
- [29] Gammon, D., Merlin, R., Masselink, W.T. ve Morkoç, H. (1986). Raman-Spectra of Shallow Acceptors in Quantum-Well Structures, *Phys. Rev. B*, 33, 2919-2922.
- [30] Glaser, E., Shanabrook, B.V., Hawkins, R.L. ve Beard, W. (1987). Far-Infrared Magnetoabsorption Study of Weakly Bound Electrons in GaAs/Al_xGa_{1-x}As Multiple Quantum-Wells, *Phys. Rev. B*, 36, 8185-8188.
- [31] Reeder, A.A., McCombe, B.D., Chambers, F. A. ve Devane, G.P. (1988). Far-Infrared Study of Confinement Effects on Acceptors in GaAs/Al_xGa_{1-x}As Quantum Wells, *Phys. Rev. B*, 38, 4318-4321.
- [32] Helm, M., Peeters, F.M., DeRosa, F., Colas, E., Harbison, J.P. ve Florez, L.T. (1991). Far-Infrared Spectroscopy of Minibands and Confined Donors in GaAs/Al_xGa_{1-x}As Superlattices, *Phys. Rev. B*, 43, 13983-13991.
- [33] Halsall, M.P., Harrison, P., Wells, J.P.R., Bradley, I.V. ve Pellemans, H. (2001). Picosecond Far-Infrared Studies of Intra-Acceptor Dynamics in Bulk GaAs and Delta-Doped AlAs/GaAs Quantum Wells, *Phys. Rev. B*, 63, (155314-1)-(155314-5).
- [34] Jiang, P. ve Kok, W.C. (2001). Far-infrared absorption spectra of doped quantum well structures, *Jour. Appl. Phys.*, 90, 1271-1274.

- [35] Halsall, M.P., Zheng, W.M., Harrison, P., Wells, J.P.R., Steer, M.J. ve Orlova, E.E. (2004). Binding energy and dynamics of Be acceptor levels in AlAs/GaAs multiple quantum wells, *Jour. Lumines.*, 108, 181-184.
- [36] Dellow, M.W., Beton, P.H., Langerak, C.J.G.M., Foster, T.J., Main, P.C., Eaves, L., Henini, M., Beaumont, S. P. ve Wilkinson, C.D.W. (1992). Resonant Tunneling through the Bound-States of a Single Donor Atom in a Quantum-Well, *Phys. Rev. Let.*, 68, 1754-1757.
- [37] Sakai, J.W., Main, P.C., Beton, P.H., La Scala, N., Geim, Jr.A.K., Eaves, L. ve Henini, M. (1994). Zero-Dimensional States in Macroscopic Resonant-Tunneling Devices, *App. Phys. Let.*, 64, 2563-2565.
- [38] Langerak, C.J.G.M., Sakai, J.W., Beton, P.H., Main, P.C., Eaves, L., Henini, M. ve Hill, G. (1994). Photoluminescence of Donor Energy-Levels in Resonant-Tunneling Devices, *Semic. Sci. Technol.*, 9, 549-551.
- [39] Langerak, C.J.G.M., Murrin, B.N., Cole, B.E., Chamberlain, J.M., Henini, M., Pate, M. ve Hill, G. (1995). Terahertz Response of Zero-Dimensional States in Resonant-Tunneling Diodes, *App. Phys. Let.*, 67, 3453-3455.
- [40] Liu, H.C., Aslan, B., Gupta, J. A., Wasilewski, Z.R., Aers, G.C., SpringThorpe, A.J. ve Buchanan, M. (2007) Quantum dots for terahertz devices, *Proc. of SPIE*, 6840, (684011-1)-(684011-7).
- [41] Yıldırım, H. ve Aslan, B. (2011) Donor-related third-order optical nonlinearities in GaAs/AlGaAs quantum wells at the THz region, *Semiconductor Science And Technology*, 26, (085017-1)- (085017-6).
- [42] Guo, F., Wang, H. ve Zhao, L. (2006). Effect of growth-interrupted method on quality of AlGaAs/GaAs multiple quantum wells prepared by MBE, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 16, 183-186.
- [43] Beall, R.B., Clegg, J.B. ve Harris, J.J. (1988). Migration of Si in Delta-Doped GaAs, *Semiconductor Science and Technology*, 3 (6), 612-615.
- [44] Schubert, E.F. (1990). Delta Doping of III-V-Compound Semiconductors - Fundamentals and Device Applications, *Journal of Vacuum Science & Technology a-Vacuum Surfaces and Films*, 8, 2980-2996.
- [45] Chiu, T.H., Cunningham, J.E., Tell, B. ve Schubert, E.F. (1988). Diffusion Studies of the Si-Delta-Doped GaAs by Capacitance-Voltage Measurement, *Journal of Applied Physics*, 64 (3), 1578-1580.

- [46] Harris, J.J., Clegg, J.B., Beall, R.B., Castagne, J., Woodbridge, K. ve Roberts, C. (1991). Delta-Doping of GaAs and $\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As}$ with Sn, Si and Be - a Comparative-Study, *Journal of Crystal Growth*, 111, 239-245.
- [47] Beall, R.B., Clegg, J.B., Castagne, J., Harris, J.J., Murray, R. ve Newman, R.C. (1989). Post-Growth Diffusion of Si in Delta-Doped GaAs Grown by MBE, *Semiconductor Science and Technology*, 4 (12), 1171-1175.
- [48] Helm, M., Peeters, F.M., Derosa, F., Colas, E., Harbison, J.P. ve Florez, L.T. (1991). Far-Infrared Spectroscopy of Minibands and Confined Donors in GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ Superlattices, *Physical Review B*, 43, 13983-13991.
- [49] Stehr, D., Metzner, C., Helm, M., Roch, T. ve Strasser, G. (2005). Resonant impurity bands in semiconductor superlattices, *Physical Review Letters*, 95 (25), (257401-1)-(257401-4).
- [50] Stehr, D., Helm, M., Metzner, C. ve Wanke, M.C. (2006). Microscopic theory of impurity states in coupled quantum wells and superlattices, *Phys. Rev. B*, 74, (085311-1)-(085311-8).
- [51] Yıldırım, H. ve Aslan, B. (2012) Effect of magnetic field on the Terahertz nonlinear optical properties in donor-doped GaAs/AlGaAs quantum wells, *Phys. Status Solidi B*, 249 (11), 2207-2212.
- [52] Vodjdani, N., Cote, D., Thomas D., Sermage, B., Bois, P., Costard, E. ve Nagle, J. (1990). Electrical and Optical Evidence of Resonant Tunneling of Holes in an N+N+ Double-Barrier Diode Structure under Illumination, *Applied Physics Letters*, 56 (1), 33-35.
- [53] Hoof, C.V., Goovaerts, E. ve Borghs, G. (1992). Sequential hole tunneling in n-type AlAs/GaAs resonant-tunneling structures from time-resolved photoluminescence, *Phys. Rev. B*, 46 (11), 6982-6989.
- [54] Geim, A.K., Foster, T.J., Nogaret, A., Mori, N., McDonell, P.J., La Scala, N., Main, P.C. ve Eaves, L. (1994). Resonant-Tunneling through Donor Molecules, *Physical Review B*, 50 (11), 8074-8077.
- [55] Schmidt, T., Tewordt, M., Haug, R.J., Klitzing, K.V., Schönherr, B. ve Grambow P. (1996). Peak-to-valley ratio of small resonant-tunneling diodes with various barrier-thickness asymmetries, *Applied Physics Letters* 68 (6), 838-840.

- [56] Sakai, J.W., Beton, P.H., Eaves, L., Main, P.C. ve Heinin, M. (1999). Effects on the resonant tunneling characteristics of a double-barrier diode of intentional and unintentional dopings in the quantum well, *Journal of Applied Physics* 86 (3): 1452-1455.
- [57] Allison, G., Mori, N., Patane, A., Endicott, J., Eaves, L., Maude, D.K. ve Hopkinson, M. (2006). Strong effect of resonant impurities on Landau-level quantization, *Physical Review Letters*, 96, (236802-1)- (236802-4).
- [58] Arıkan, B. (2015). *InAs/GaSb tip-II süperörgü kızılötesi fotodedektör yapıların MBE tekniği ile GaSb ve GaAs alttaşlar üzerine büyütülmesi*. Yayımlanmamış Doktora tezi. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi.
- [59] Erkuş, M. (2015). *Kızılötesi dedektör uygulamaları için InAsSb ve GaInAsSb bileşiklerinin GaAs alttaş üzerine MBE tekniği ile büyütülmesi*. Yayımlanmamış Yüksek Lisans tezi. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi.
- [60] Sun, X. (2002). High Performance 1300 nm Photodetectors Grown by Molecular Beam Epitaxy, Doktora Tezi, Austin: Texas Üniversitesi.
- [61] Newstead, S.M., Kubiak, R.A.A. ve Parker, E.H.C. (1987). On the Practical Applications of MBE Surface Phase-Diagrams, *Journal of Crystal Growth*, 81, 49-54.
- [62] Smith, G.W., Pidduck, A.J., Whitehouse, C.R., Glasper, J.L., Keir, A.M. ve Pickering, C. (1991). Surface-Topography Changes during the Growth of GaAs by Molecular-Beam Epitaxy, *Applied Physics Letters*, 59, 3282-3284.
- [63] Daweritz, L. (1991). Surface Characterization by Rheed Techniques during Mbe Growth of GaAs and $Al_xGa_{1-x}As$, *Superlattices and Microstructures*, 9, 141-145.
- [64] Gfroerer, T. H. (2000). Photoluminescence in Analysis of Surfaces and Interfaces. R.A. Meyers(Ed.), *Encyclopedia of Analytical Chemistry* içinde (9209-9231). Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- [65] Chand, N. (1993). Growth Of High Quality AlGaAs/GaAs Heterostructures By Molecular Beam Epitaxy For Photonic And Electronic Device Applications, *Thin Solid Films*, 231, 143-157.
- [66] Özdemir, S. (2014). *Kızılötesi Algulamada Kullanılan Kendiliğinden Oluşan InAs/GaAs Kuantum Nokta Yapıların MBE Tekniğiyle Büyütülmesi ve Karakterizasyonu*. Yayımlanmamış Yüksek Lisans tezi. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi.

- [67] Korkmaz, M. (2014). *Orta-Kızılötesi Dalgaboyunda Çalışan InAs/GaSb Süperörgü Fotodiyotların Opto-Elektronik Karakterizasyonu*. Yayımlanmamış Yüksek Lisans tezi. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi.
- [68] Chang, K.H., Lee, C.P., Wu, J.S., Liu, D.G., Liou, D.C., Wang, M.H., Chen, L.J. ve Marais, M.A. (1991). Precise determination of aluminum content in AlGaAs, *Journal of Applied Physics*, 70 (9), 4877-4882.
- [69] Schubert, E. F. (1993) *Doping in III-V Semiconductors*. NY, ABD: Cambridge University Press.
- [70] Kasap, S., Capper, P. (2006) *Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials*. NY, ABD: Springer Science+Business Media, Inc..

ÖZGEÇMİŞ

Adı-Soyadı : Güven KORKMAZ
Yabancı Dil : İngilizce
Doğum Yeri ve Yılı : Malatya / 1981
E-Posta : guvenkorkmaz@yahoo.com

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2017, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı Doktora
- 2010, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans
- 2006, Anadolu Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Lisans

Yayınları ve Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

- Arikan, B., Korkmaz, G., Suyolcu, Y.E., Aslan, B., Serincan, U. (2013). On the structural characterization of InAs/GaSb type-II superlattices: The effect of interfaces for fixed layer thicknesses", *Thin Solid Films*, 548, 288-291.
- Aslan, B., Yıldırım, H. ve Korkmaz, G. (2014) Semiconductor shallow impurity level transitions for terahertz generation and detection, *The 7th International Symposium on Ultrafast Phenomena and Terahertz Waves (7th ISUPTW) 'nda* sunulan bildiri. *Shanghai, Chinese Academy of Sciences (CAS)*.
- Korkmaz, G., Yıldırım, H., Aslan, B. (2013) MBE growth and characterization of THz detector structures using quantum confined impurity atoms, *9th Nanoscience and Nanotechnology Congress (NANOTR-9)'da* sunulan bildiri. Erzurum, Atatürk Üniversitesi.
- Arikan, B., Korkmaz, G., Suyolcu, Y. E., Aslan, B. ve Serincan, U. (2013) Crystallographic characterization of InAs/GaSb type-II superlattices: The effect of interfaces for fixed layer thicknesses. *9th Nanoscience and Nanotechnology Congress (NANOTR-9)'de* sunulan poster. Erzurum, Atatürk Üniversitesi.

- Korkmaz, G., Sentürk, Z., Ergün, Y. (2009) GaInNAs SESAMs passively mode-locking 1.3 μm solid-state lasers. *The 5th Nanoscience and Nanotechnology Congress (NANOTR-5)* 'de sunulan poster. Eskişehir, Anadolu Üniversitesi.
- G. Korkmaz, T. Erten, Y. Ergün, (2009) Effect of excitons to the inter-subband absorption in GaSb-InAs pin superlattices, *The 5th Nanoscience and Nanotechnology Conference (NanoTR5)* 'de sunulan poster. Eskişehir, Anadolu Üniversitesi.