

**TEK KUANTUM KUYU ÜZERİNDEN
TINLAŞIM TÜNELLEME OLAYININ
OPTOELEKTRONİK OLARAK
İNCELENMESİ**

Ayşe Şevik

Yüksek Lisans Tezi

Fizik Anabilim Dalı

Aralık 2014

**Bu tez çalışması 1204F069 ve 1106F121 numaralı proje kapsamında
Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Başkanlığı
tarafından desteklenmiştir.**

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Ayşe ŞEVİK'in "Tek kuantum kuyu üzerinden tınlaşım tünelleme olayının optoelektronik olarak incelenmesi" başlıklı Fizik Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 01.12.2014 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı) :	Doç. Dr. Bülent ASLAN
Üye :	Doç. Dr. Uğur SERİNCAN
Üye :	Doç. Dr. Hasan YILDIRIM

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TEK KUANTUM KUYU ÜZERİNDEN TINLAŞIM TÜNELLEME OLAYININ OPTOELEKTRONİK OLARAK İNCELENMESİ

Ayşe ŞEVİK

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Bülent ASLAN

2014, 71 sayfa

Tınlaşım tünelleme diyotları uzun yıllar önce önerilmiş olmasına rağmen hala bazı temel fizik sorularını aydınlatacak ve birçok yeni uygulamada kullanılacak potansiyele sahiptir. Tınlaşım tünelleme aygıtları, özellikle son yıllarda önerilen safsızlık atomlarına dayalı Terahertz (THz) bölgede çalışan ışık yayıcılar ve ışık algılayıcıların gerçekleştirilebilmesi bakımından önem taşımaktadır. Bahsi geçen aygıtların hayata geçirilebilmesi için öncelikle çift engel tınlaşım tünelleme diyot yapısında aygıt performansını etkileyen etkin mekanizmaların tanımlaması ve test örneklerinin üretilerek karakterizasyon sonuçlarının iyi anlaşılması gerekmektedir.

Bu çalışmada, GaAs/Al_xGa_{1-x}As malzeme sistemi kullanılarak sistematik olarak çift engel tınlaşım tünelleme diyot yapıları moleküler demet epitaksi yöntemiyle büyütülmüş ve yapı içindeki akım mekanizmalarının bağlı olduğu parametreler tanımlanmıştır. Bu kapsamda, farklı kuantum kuyu ve engel genişliğine sahip aygıtların karakterizasyon çalışmalarında temel olarak fotoluminesans, elektro fotoluminesans ve akım-voltaj teknikleri kullanılmış ve sıcaklık bağımlı olarak yapılan ölçüm sonuçları analiz edilmiştir. Ek olarak, THz uygulamalarına temel oluşturmak amacıyla kuantum kuyu içine katkılanmış safsızlık atomları üzerinden tınlaşım tünelleme akım mekanizması çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar, kuramsal hesaplamalarla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çift engel tınlaşım tünelleme, Kuantum kuyu, Terahertz, Safsızlık atomları.

ABSTRACT

Master of Science Thesis

OPTOELECTRONIC INVESTIGATION OF RESONANCE TUNNELING THROUGH A SINGLE QUANTUM WELL

Ayşe ŞEVİK

Anadolu University

Graduate School of Sciences

Physics Program

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Bülent ASLAN

2014, 71 pages

The resonant tunneling diodes have potential to be used in many new applications and enlighten unanswered questions in the fundamental physics although they had been proposed long time ago. The concept of resonant tunneling has crucial importance for light emitters and photo detectors based on impurity atom transitions. For this purpose, the factors affecting double barrier resonant tunneling diode performance should be defined and characterization results of the fabricated test samples should be investigated.

In this thesis, double barrier resonant tunneling diodes based on GaAs/Al_xGa_{1-x}As materials were grown by molecular beam epitaxy and parameters dependent on current mechanism of the structure were defined. Photoluminescence, electro photoluminescence and current-voltage methods including temperature dependent measurements were employed to characterize the devices having different quantum well and barriers within this framework. In order to provide a basis for THz applications, resonant tunneling current mechanism was studied through impurity atoms doped in quantum wells. The experimental results were extensively studied and compared with the results obtained from the theoretical calculations.

Keywords: Double Barrier Resonant Tunneling, Terahertz, Quantum Well, Impurity Atoms.

TEŞEKKÜRLER

Çalışmalarımnda engin bilgileri ve tecrübeleri ile bana yol gösteren, elinden gelen bütün imkânları sağlayan, sadece bilgisiyle değil davranışları ile de her zaman örnek aldığım değerli öğretmenim Doç. Dr. Bülent Aslan'a sonsuz teşekkürler.

Çalışmalarımnda bilgi ve yorumlarını esirgemeyen Doç. Dr. Uğur Serincan ve Yrd. Doç. Dr. Mustafa Kulakçı'a teşekkür ederim. Tez kapsamında büyütülen yapıların teorik hesaplamalarından yararlandığım Doç. Dr. Hasan Yıldırım'a teşekkür ederim.

Üzerinde çalıştığım yapıları büyüten, aklıma takılan her soruya bıkmadan çözüm bulmaya çalışan ve üzerimde en az hocalarım kadar emeği geçen çalışma arkadaşım Güven Korkmaz'a çok teşekkür ederim. Tez yazımı sürecinde bilgilerini ve tecrübelerini paylaşan ve elinden gelen yardımları esirgemeyen Bülent Arıkan'a teşekkür ederim.

Her ihtiyacım olduğunda yardımına koşan, sistematik çalışmasına hayran olduğum ve birlikte çalışmaktan keyif aldığım kadim dostum Öner Akdik'e en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Birlikte keyifli zaman geçirdiğim Nanoboyut Araştırma Laboratuvarında bulunan tüm arkadaşlarıma teker teker teşekkür ederim. Bana değerli zamanlarını ayıran ve yardımlarını esirgemeyen Melih Korkmaz ve Samet Özdemir'e ayrıca teşekkür ederim.

Sevgisini ve desteğini her zaman yanımda hissettiğim, varlığıyla hayatımın rengi olan ve duygularımı anlatmak için kelimelerin kifayetsiz kaldığı değerli arkadaşım Serhat Cankut'a sonsuz teşekkürler. İyi ki varsın!

Hayatımın her anında olduğu gibi bu çalışmamda da tüm zorluklara karşı desteğini ve fedakârlığını esirgemeyen, bana okuma aşkını aşılayan canım annem Münciye Şevik'e ve canım babam Halil Şevik'e sabırlarından ötürü minnattarım. Her zaman yanımda olduklarını bildiğim ablam Banu Berispak, eniştem Mesut Berispak ve kardeşim Emin Şevik'e çok teşekkür ederim. Varlığıyla evimizin

neşesi olan, çalışmalarımı sevimli bir şekilde sabote eden sevgili yeğenim Yusuf Mert Berispak'a teşekkür ederim. İyi ki varsınız!

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜRLER.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
KISALTMALAR DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. TINLAŞIM TÜNELLEME OLAYI	4
2.1 Kuantum Kuyu Yapıları.....	4
2.2 Tünelleme ve Tınlaşım Tünelleme.....	6
2.3 Tınlaşım Tünellemeye Etki Eden Parametreler.....	9
2.3.1 Engel genişliği ve yüksekliği.....	9
2.3.2 Kuantum kuyu genişliği.....	12
2.3.3 Sıcaklık.....	14
3. DENEYSEL YÖNTEMLER	16
3.1 Epitaksiyel Büyütme.....	16
3.2 Aygıt Üretimi.....	19
3.3 Optoelektronik Karakterizasyon Yöntemleri.....	23
3.3.1 Fotoluminesans (PL) ölçümü.....	23
3.3.2 Akım- Voltaj (I-V) ölçümü.....	24

4. GaAs/Al_xGa_{1-x}As ÇİFT ENGEL TINLAŞIM TÜNELLEME YAPILARININ KARAKTERİZASYON	26
5. KUYU İÇİNDEKİ SAFSIZLIK ATOMLARI ÜZERİNDEN TINLAŞIM TÜNELLEMEİNİN GÖZLENMESİ	43
6. SONUÇ	50
KAYNAKÇA.....	52

ŞEKİL DİZİNİ

2. 1.	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ kuantum kuyusunun şematik gösterimi.....	5
2. 2.	Kuantum kuyu içerisindeki kesikli enerji seviyeleri ve dalga fonksiyonları.....	6
2. 3.	Çift engel yapısı ve elektrona eşlik eden dalga fonksiyonlarının matematiksel formu.....	7
2. 4.	Bir çift engel tınlaşım tünelleme yapısının farklı voltajlar altındaki iletkenlikbant yapısının şematik gösterimi. (a) voltaj yokken, (b) eşik durumu, (c) tınlaşım ve (d) tınlaşımın yeniden bozulduğu durum. Taralı bölge, Fermi denizine karşı.....	8
2. 5.	Farklı kuyu genişlikleri (L2) için çift engel tınlaşım tünelleme diyot yapısındaki geçirgenlik katsayısı.	9
2. 6.	Potansiyel engelin şematik gösterimi.	10
2. 7.	Dalga vektörünün engel içinde ve dışındaki hareketinin şematik gösterimi.....	12
2. 8.	100Å $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ / 50Å GaAs / 100Å $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ yapısına sahip tınlaşım tünelleme diyotu için enerjinin bir fonksiyonu olarak geçirgenlik katsayısı grafiği.	13
2. 9.	Potansiyel kuyunun şematik gösterimi.....	13
2. 10.	100Å $\text{Ga}_{0,8}\text{Al}_{0,2}\text{As}$ / 50Å GaAs / 100Å $\text{Ga}_{0,8}\text{Al}_{0,2}\text{As}$ yapısına sahip tınlaşım tünelleme diyotunun farklı sıcaklıklarda akım – voltaj grafiği... ..	16
3. 1.	Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda kurulu MBE sistemi.....	18
3. 2.	Aygıt üretim basamaklarının şematik gösterimi.	23
3. 3.	Numunelerin ölçümünde kullanılan PL düzeneği, çerçeve içinde kalan bölüm voltaj bağımlı fotoluminesans (E-PL) ölçümlerinde kullanılmıştır..	26
3. 4.	Tınlaşım tünelleme mekanizmasını anlamak için kurulan I-V ölçüm düzeneği.	27
4. 1.	Al alaşım oranının (x) artmasıyla PL ölçümünde $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ sinyalinin değişim grafiği.....	29

4. 2.	AS-1 numaralı örneğin sıcaklık bağımlı I-V ölçüm sonucu.	30
4. 3.	AS-1 kodlu örneğin ~6 K'deki voltaj bağımlı fotoluminesans (E-PL) grafiği	31
4. 4.	Farklı kuyu ve engel genişliklerine sahip örneklerin I-V ölçüm grafiği. ...	32
4. 5.	GaAs üst katmanı aşındırılmış numunelerin düşük sıcaklık (~8K) PL ölçüm grafiği	32
4. 6.	AS-1 kodlu örneğin mesa büyüklüğüne göre I-V grafiği.....	34
4. 7.	Çift engel tınlaşım tünelleme yapılarında kenar uzunlukları 60 µm ve 100 µm büyüklüğünde kare mesa yapılardan alınan akım-voltaj grafikleri.	34
4. 8.	Düşük sıcaklıkta (~77K) iki farklı mesa büyüklüğü için AS-1 ve AS-4'ün karşılaştırılmalı I-V ölçüm sonucu.....	35
4. 9.	AS-4 ve AS-6 kodlu örneklerin düşük sıcaklık (~8K) I-V ölçüm grafiği. 36	
4. 10.	AS-1 kodlu örnek için, pasivasyon işlemi uygulanmış ve uygulanmamış farklı büyüklüklerdeki aygıtların I-V ölçüm sonuçları (~77 K).....	37
4. 11.	Farklı engel ve kuyu genişliklerine sahip çift engel tınlaşım tünelleme yapılarında iletim katsayısı-enerji grafiği.....	38
4. 12.	Geniş kuyuya sahip AS-7 numaralı tınlaşım tünelleme örneğinden farklı büyüklüklerdeki (60µm, 100µm ve 200µm) kare mesa yapıların (sol) ölçülen ve (sağ) hesaplanan akım yoğunluğu-voltaj grafikleri.....	39
4. 13.	Düşük sıcaklık voltaj bağımlı fotoluminesans (E-PL) ölçümleri. AS-7 kodlu örnekten (sol) büyük voltaj aralığında alınan PL sinyalinin değişimi ve (sağ) GaAs külçe ve kuantum kuyu enerji seviyesinden alınan sinyalin daha küçük voltaj bölgesinde.....	40
4. 14.	(sol) Düşük sıcaklık E-PL ölçümlerinden (Şekil 4.15) elde edilen PL şiddeti değişimi ve (sağ) ölçüm alınan aygıtın farklı koşullardaki akım-voltaj grafiği.....	41
4. 15.	AS-7 numaralı örnek için PL şiddetindeki değişim ile tünelleme akımının karşılaştırılması.....	41
4. 16.	(sol) PL sinyal şiddetinin uygulanan voltajın fonksiyonu olarak değişimi. (sağ) Kuantum kuyu taban enerji seviyesinin (E1) elektrik alana bağlı olarak hesaplanan değişimi.	43

4. 17.	Kuantum sınırlı Stark etkisinin (quantum-confined Stark effect – QCSE) şematik gösterimi.....	44
4. 18.	Engel dışında sınırlı enerji seviyelerinin oluşmasını ve PL sinyali yaratan olası geçişleri gösteren bant yapısının şematik gösterimi.....	45
5. 1.	Kuantum kuyu içindeki safsızlık atomlarının sınırlandırılmış enerji seviyelerinin şematik gösterimi.....	47
5. 2.	Çift engel tınlaşım tünelleme diyot içindeki safsızlık durumları kullanılarak THz ışınım üretiminin şematik gösterimi.....	48
5. 3.	(sol) AS-1 ve (sağ) AS-2 kod numaralı örneklerin sıcaklık bağımlı I-V ölçüm sonuçları.	49
5. 4.	AS-1 ve AS-2 kod numaralı örneklerin ~6K’de karşılaştırmalı I-V ölçüm sonuçları: (sol) lineer, (sağ) türev (dI/dV).....	50
5. 5.	AS-1 ve AS-2 kod numaralı örneklerin ~6K sıcaklığındaki 200 µm büyüklüğünde kare mesa yapılardan alınan I-V ölçüm sonuçları: (sol) lineer, (sağ) logaritmik eksen.	50
5. 6.	AS-1 ve AS-2 kod numaralı örneklerin ~6K sıcaklıktaki karşılaştırmalı akım-voltaj eğrilerinin türevi (dI/dV).....	51
5. 7.	AS-1 (sol) ve AS-2 (sağ) kodlu örneğin ~6 K sıcaklığındaki voltaj bağımlı fotolüminesans (E-PL) grafiği.	52
5. 8.	AS-1 ve AS-2 kodlu örneklerin 1,61 eV (770 nm) enerji değerine karşılık gelen PL sinyalinin şiddetinin voltaja bağlı değişimi.	52

ÇİZELGELER DİZİNİ

Tablo 3.1.	Çift engel tınlaşım tünelleme için genel yapı.....	20
Tablo 3.2.	Çift engel tınlaşım tünelleme çalışmaları için büyütülen yapılar ...	20
Tablo 3.3.	Tez kapsamındaki örnekler için yapılan aygıt üretme işlemleri.....	24
Tablo 4.1.	Deneysel ve teorik olarak elde edilen sonuçların karşılaştırılma tablosu.....	33

KISALTMALAR DİZİNİ

Al	: Alüminyum
AlGaAs	: Alüminyum Galyum Arsenik
DBRT	: Çift Engel Tınlaşım Tünelleme
E-PL	: Elektro Fotolüminesans
GaAs	: Galyum Arsenik
I-V	: Akım-Voltaj
MBE	: Moleküler Demet Epitaksi
MOCVD	: Metal-Organik Kimyasal Buharlı Büyütme
PL	: Fotolüminesans
THz	: Terahertz
QCSE	: Kuantum Sınırlı Stark Etkisi
QD	: Kuantum Nokta
QW	: Kuantum Kuyu

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Son yıllarda yarıiletken büyütme ve fabrikasyon tekniklerinin hızlı bir şekilde ilerlemesi, yeni nesil yarıiletken aygıtlarının geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Farklı yasak enerji aralığına sahip malzemelerin birbiri üzerine büyütülebilir olması, taşıyıcıların kuantum sınırlandırılmasına ve düşük boyutlarda yarıiletken aygıtların çeşitliliğinin artmasına imkân tanımıştır: taşıyıcıların hareketinin bir boyutta sınırlandırıldığı sisteme kuantum kuyu (Quantum Well, QW), iki boyutta sınırlandırıldığı sisteme kuantum tel (Quantum Wire) ve üç boyutta sınırlandırıldığı sisteme kuantum nokta (Quantum Dot, QD) adı verilmektedir. Yarıiletken katman yapılarının istenilen şekillerde tasarlanabilir, istenilen elektromanyetik tayf bölgesi için ayarlanabilir ve günümüzde üretilmesinin kolay olması, kuantum kuyu yapılarını hem uygulama hem de temel fizik kavramlarının araştırılması bakımından ilgiyi artırmıştır. Moleküler demet epitaksi (molecular beam epitaxy, MBE), metal-organik kimyasal buharlı büyütme (metal-organic chemical vapor deposition, MOCVD) gibi epitaksiyel kristal büyütme tekniklerinin gelişmesiyle kuantum tünelleme mekanizmalarına dayalı lazerler, algılayıcılar, transistörler, diyotlar gibi birçok kuantum kuyu aygıtlar üretilmiştir. Bu aygıtlar, yıllarca yoğun araştırma nesnelere olmuş ve birçoğu modern elektronik devrelerin bir parçası haline getirilmiştir [1].

Tınlaşım tünelleme diyotu, kuantum sınırlama etkisine dayalı olarak çalışan optoelektronik aygıtlara ilk örneklerden biridir. Son zamanlarda bu cihazların arasında en ilgi duyulana, frekans katlayıcıları (frequency multipliers), parite jeneratörleri (parity generators), çoklu durum bellek (multistate memory), analog-dijital dönüştürücüleri, optoelektronik cihazlar gibi çeşitli uygulama alanları olan çift engel tınlaşım tünelleme diyotları (double barrier resonance tunneling diode, DBRT) olmuştur [2]. Öyle ki, fizik alanındaki en saygın süreli yayınlarından biri olan Applied Physics Letters dergisinde Aralık 2011'de yayınlanan ve çift engel tınlaşım tünelleme diyot yapısı üzerindeki çalışmalardan oluşan iki makale [3, 4], derginin Ocak 2012'de en çok okunan 20 makale listesinde ikinci ve beşinci sırada yer almıştır [5].

DBRT yapıları ilk defa 1973'de Esaki ve Tsu tarafından teorik olarak önerilmiştir [6] ve 1974 yılında ise Chang ve Esaki tarafından [7] deneysel olarak çalışılmıştır. Zaman içerisinde, tınlaşım tünellemenin karmaşık iletim sürecini araştırmak için çeşitli ölçüm teknikleri geliştirilmiştir. Manyetik tünelleme, LO-fonon tınlaşım tünelleme [8] ve uzay yük biriktirmesi [9, 10] araştırmaları için yaygın olarak kullanılmıştır. Fotolüminesans ölçümleri elektron birikimini belirlemek için kullanılmıştır [11, 12]. Hidrostatik basınç altında tünelleme akım ölçümleri, X-vadi çalışmaları için kullanılmıştır [13, 14]. Bu tekniklerin önemli başarılarından biri de tınlaşım tünelleme diyotlarının, kuantum kuyudaki elektronların dinamik olarak yeniden dağılmasından kaynaklanan negatif diferansiyel iletkenlik bölgesinde bir içsel çift kararlılık (bistability) olduğunu ortaya koymasındır [15].

1980'lerden bu yana, tınlaşım tünelleme diyotlar üzerindeki araştırmalar üretim teknolojisindeki ilerlemelerle paralel olarak ilerlemiştir. Üretim teknolojisindeki ilerlemeler sayesinde; kuyu potansiyeli, engel genişliği ve kuantum kuyu genişliği gibi uygun yapısal parametrelerin farklı şekillerde tasarlanmasına ve ayrıca kuyu içerisine safsızlık atomlarının katkılanmasına imkân sağlamıştır. Bu avantajlarından ötürü, kuantum kuyu içindeki tek elektron üzerinden tınlaşım tünelleme olayı ilgi çekmiştir [16, 17]. Safsızlık atomları üzerinden tınlaşım tünelleme akımının gözlenmesi için yapılan çalışmalar temel olarak çift engelli diyot yapısını kullanmaktadır [18-22]. Dellow ve ark. aktif kesit alanı $1 \mu\text{m}^2$ 'den küçük olan diyotlar kullanarak yaptığı çalışmada, akım-voltaj grafiklerinde verici seviyeleri üzerinden gerçekleşen tünelleme akımlarını keskin tepeler olarak gözlemiştir [21]. Bulguları tartışılan bu çalışmadan sonra, Sakai ve ark. farklı büyüklükte ($1 \mu\text{m} - 100 \mu\text{m}$) diyotlar kullanarak yaptığı sistematik çalışmada, sıfır boyutlu bu safsızlık atomları enerji seviyelerinden olan tünelleme akımlarını, akım-voltaj ölçümleri ile doğrulamıştır [23]. Tınlaşım tünelleme diyot yapılarını kullanarak yapılan diğer çalışmalarda, Schmidt ve ark. engel kalınlığının [22] ve Allison ve ark. manyetik alanın [24] tünellemeye etkisini sistematik şekilde araştırmışlardır.

Bu tez çalışmasının kapsamı, kuantum kuyu genişliği, engel genişliği ve yüksekliği gibi yapısal parametrelerin ve sıcaklığın DBRT diyot yapısında tünelleme akımına olan etkilerinin incelenmesini içermektedir. Ayrıca, DBRT yapısında kuyu içine kasten yerleştirilen safsızlık atomlarının bağlanma enerjileri üzerinden tünelleme akımı gözlemlenmeye çalışılmıştır. Giriş bölümünde DBRT yapısı üzerindeki çalışmalardan ve bu yapının günümüzdeki öneminden bahsedilmiştir. İkinci bölümde, tınlaşım tünelleme yapısının genel özellikleri ve yapısal parametrelerin tınlaşım tünelleme akımına olan etkileri anlatılmıştır. Üçüncü bölümde, tez kapsamında DBRT diyot yapılarının üretim, fabrikasyon ve karakterizasyonunda kullanılan yöntem ve tekniklerden bahsedilmiştir. Bölüm 4’de tez kapsamında büyütülen yapılarının opto-elektronik karakterizasyon sonuçları verilmiştir. Beşinci bölümde kuantum kuyu içerisindeki safsızlık atomlarının opto-elektronik karakterizasyon sonuçları verilmiş ve son olarak da, altıncı bölümde elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

2. TINLAŞIM TÜNELLEME OLAYI

Üretim tekniklerinin gelişmesiyle birlikte yarıiletken katman yapılarının farklı şekillerde tasarlanabilir, istenilen elektromanyetik tayf bölgesi için ayarlanabilir ve günümüzde üretilmesinin kolay olması kuantum kuyu yapılara hem uygulama hem de temel fizik kavramlarının araştırılması bakımından ilgiyi arttırmıştır. Bu yapılar yeni nesil elektronik ve opto-elektronik aygıt üretiminde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

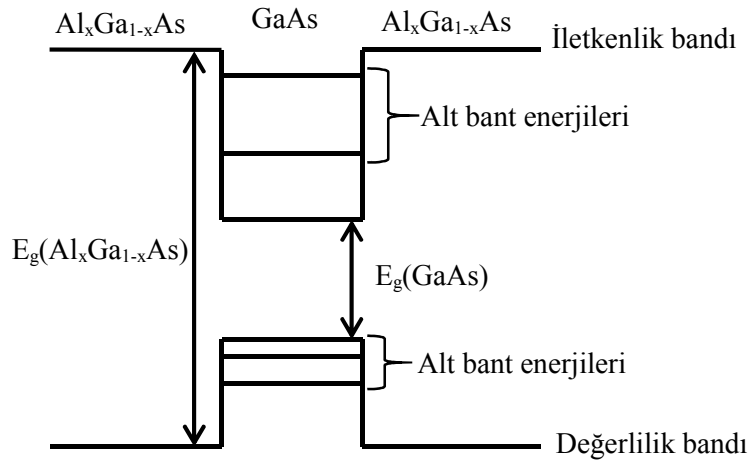
Günümüze kadar kuantum kuyu tabanlı yapılardan lazerler, transistörler, güneş pilleri, diyotlar gibi birçok aygıt üretilmiş [25, 1] olmasına rağmen kuantum kuyu yapıları halen yeni nesil aygıt üretiminde çok yoğun olarak kullanılmaktadır. Son zamanlarda kuantum kuyu aygıtları içinde en çok ilgi duyulan ise yüksek frekans sinyal üretimi, yüksek hızlı anahtarlama ve çok-değerli veri saklama (multi-valued data storage) gibi uygulama alanı olan çift engel tınlaşım tünel diyotları olmuştur [15]. İlk önerildiği tarihten bu yana çok zaman geçmiş olmasına rağmen çift engel tınlaşım tünelleme diyot yapısı [6], hala birçok yeni uygulamada ve temel fizik konularının aydınlatılmasında kullanılacak potansiyele sahiptir.

Bu bölümde, tez kapsamında büyütülen ve optoelektronik ölçüm sonuçları sonraki bölümlerde tartışılacak olan tınlaşım tünelleme diyot numunelerin davranışlarını daha iyi anlamak için kuantum kuyu yapılarından, tünelleme ve tınlaşım tünellemenin özelliklerinden ve tınlaşım tünellemeyi etkileyen etkenlerden kısaca bahsedilecektir.

2.1 Kuantum Kuyu Yapıları

Moleküler demet epitaksi, metal-organik kimyasal buharlı büyütme gibi epitaksiyel kristal büyütme tekniklerinin gelişmesiyle 1970'li yıllarda kuantum kuyu süperörgüler ilgi odağı olmuş ve literatüre giren birçok araştırma yapılmıştır [26, 27]. W. Wiegmann tarafından MBE tekniği kullanılarak üretilmiş kuantum kuyu yapılarının, külçe yapılar gibi sürekli enerji seviyeleri yerine kesikli enerji seviyelerine sahip olduğu deneysel olarak göstermiştir [28]. Kuantum kuyu yapıların sahip oldukları bu kuantum mekaniksel özellikleri, opto-elektronik uygulamalarda yeni ve çok farklı kullanım alanının ortaya çıkmasına sebep olmuştur.

Kuantum kuyular, kuantum mekanik etkilerin gözlemlenebildiği ve kontrol edilebildiği ince katmanlı yarıiletkenlerden oluşmaktadır. Kuantum kuyuyu oluşturmak için bant aralığı küçük bir malzeme, bant aralığı daha büyük bir başka malzeme arasında sıkıştırılır ve oluşan potansiyel süreksizlik iletkenlik bandındaki elektronlar ve değerlilik bandındaki boşluklar için bir boyutta sınırlanma yaratmış olur. Şekil 2.1’de bant aralığı küçük olan GaAs malzemesi ile bant aralığı daha büyük olan $Al_xGa_{1-x}As$ malzemesinin oluşturduğu kuantum kuyu yapısı ve kesikli alt bant enerjileri şematik olarak gösterilmiştir.



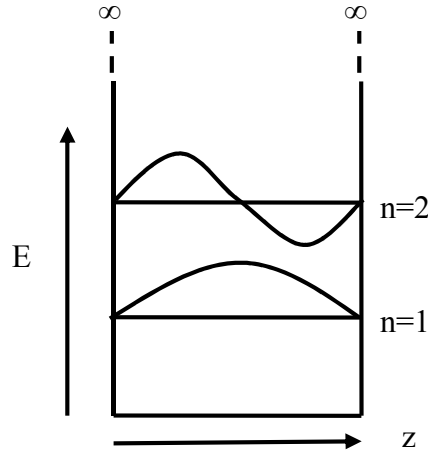
Şekil 2. 1. $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ kuantum kuyusunun şematik gösterimi.

Şekil 2.1’de gösterilen x Al (Alüminyum) alaşım oranını, $E_g(Al_xGa_{1-x}As)$ $Al_xGa_{1-x}As$ malzemesi için yasak enerji aralığını ve $E_g(GaAs)$ ise GaAs malzemesi için yasak enerji aralığını temsil etmektedir. Yapıdaki küçük yasak bant aralığına sahip malzeme taşıyıcılar için *kuyu* görevi görürken, büyük yasak bant aralığına sahip malzeme ise *engel* (bariyer) görevi görür. Aradaki (kuyu) katman kalınlığının yeterince ince ($10 - 150 \text{ \AA}$) olması durumunda, hareketleri bir yönde (z , yani büyütme yönü) sınırlanan elektron ve boşluklar, kuyu içinde kuantum mekaniksel olarak yeni oluşan kesikli enerji seviyelerinde (alt bant) barınabilir hale gelirler.

Potansiyelin kuyu içerisinde sıfır, kuyu dışında sonsuz olduğu durumu incelediğimizde, kuyu içindeki parçacık için Schrödinger denklemi çözümünden elde edilen alt bant enerji seviyeleri;

$$E_n = \frac{(nh)^2}{8m^*L^2} \quad (2.1)$$

olarak ifade edilir [28]. Bu denklemde, m^* taşıyıcının etkin kütlesi, $h=2\pi\hbar$ Planck sabiti, L kuyu genişliği ve n kuantum sayısını temsil etmektedir. Kuantum sayısı (n) tam sayı değerleri aldığından bu enerji seviyeleri klasik fizikteki gibi sürekli değil kesiklidir. Sonsuz potansiyel kuantum kuyu içindeki iletkenlik bandında oluşan enerji seviyeleri ve buna eşlik eden dalga fonksiyonları Şekil 2.2’de şematik olarak gösterilmiştir.

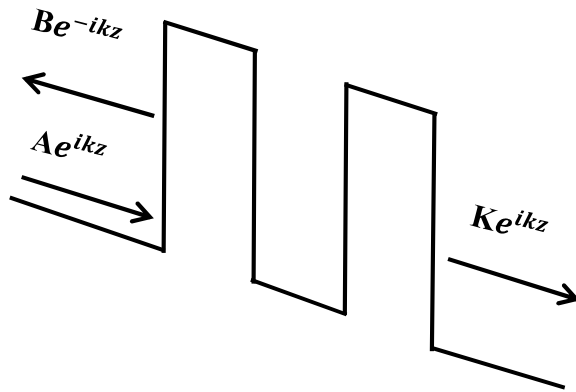


Şekil 2.2. Kuantum kuyu içerisindeki kesikli enerji seviyeleri ve dalga fonksiyonlarının gösterimi.

2.2 Tünelleme ve Tınlışım Tünelleme

Klasik fizik bilgilerimize göre bir parçacığın enerjisi, karşılaştığı engeli aşacak kadar büyük değilse, parçacık o engeli geçemez. Ancak kuantum fiziğinin temel özelliklerinden biri olan *tünelleme* olayı, bir parçacığın enerjisi yeterli olmasa bile engelin içine belli bir olasılık yoğunluğunda nüfuz edebilmesidir [29]. Eğer parçacığın karşılaştığı engel yeterince ince ise, parçacık engelin karşı tarafına, var olabileceği başka bir ortama geçebilir. Gelen parçacığın karşılaştığı sistem içinde nasıl hareket edeceği, Schrödinger denkleminin çözümüyle bulunur [29].

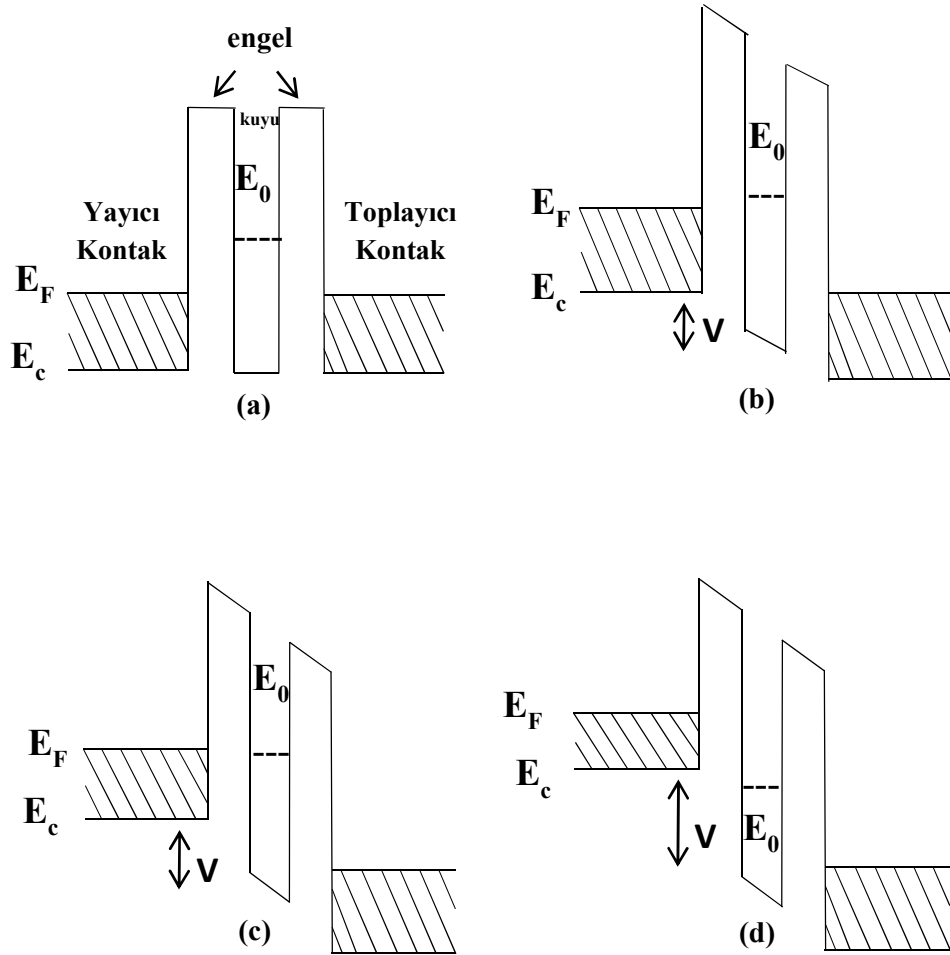
Aralarında uygun bir mesafe (1–10 nm) olacak şekilde iki engel Şekil 2.3’deki gibi yerleştirildiğinde bu sistem *çift engel* olarak tanımlanır ve tek engel sistemlere göre oldukça farklı taşınım özellikleri gösterir [28]. Engellerin olduğu bölgelerdeki süreklilik sınır koşulları kullanılarak çözülen Schrödinger denklemi, elektronların kuyu içine ve ikinci engel sonrasına geçebilme olasılıkları hakkında bilgi verir. Şekil 2.3’de bir aygıt uygulamasındaki durumun şematik gösterimi sunulmuştur: yük taşıyıcıları (elektronlar), uygulanan voltaj sayesinde çift engel yapıya sol taraftan yaklaşmakta, bir kısmı karşılaştıkları engelden yansıyor geri dönmekte ve bir kısmı da tünelleme yoluyla sağ tarafa doğru ilerlemeye devam etmektedirler. Şekil 2.3’de gösterilen A, B ve K bulunması gereken ve geçirgenliğin büyüklüğü hakkında bilgi veren sabitlerdir. Ayrıca k dalga sayısını temsil etmektedir [28].



Şekil 2.3. Çift engel yapısı ve elektrona eşlik eden dalga fonksiyonlarının matematiksel formu.

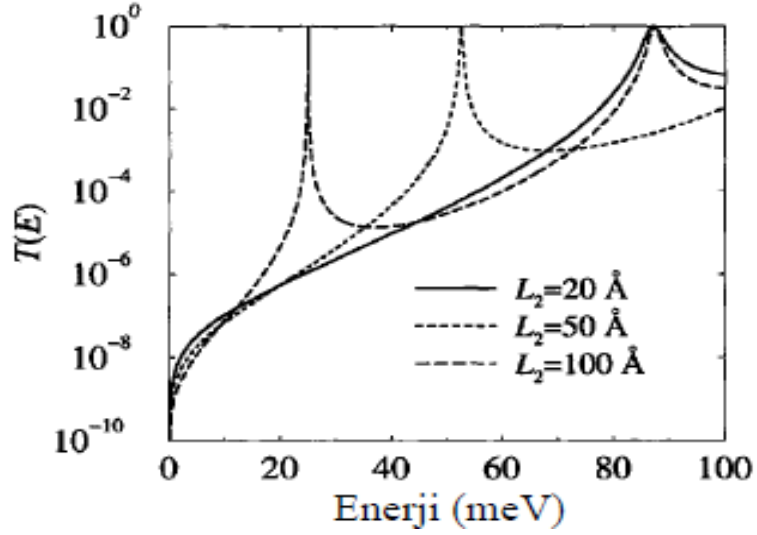
Kuyu içindeki sınırlamadan kaynaklı oluşan kesikli enerji seviyelerinin, uygulanan voltajın etkisiyle sol taraftaki engel öncesinde enerji seviyesi ile hizalanması durumunda, elektronların engeli geçme olasılıkları 1 olur ve bu durum *tınlaşım* (rezonans) olarak bilinir. Yani tınlaşım durumunda çift engel yapısı yük taşıyıcılar için görünmez olur. Bu konuda Chang ve Esaki’nin 1974 yılında yapmış oldukları çalışma [7], çoklu kuantum kuyu yapıları ve tınlaşım tünelleme olayı ile ilgili kayıtlı ilk deneysel çalışma olduğundan büyük önem taşımaktadır.

Tınlaşım tünelleme diyot yapıları basit olmasına rağmen bu zamana kadar birçok çalışmada kullanılmışlar ve halen üzerlerindeki çalışmalar devam etmektedir. Şekil 2.4’de tipik bir çift engel tınlaşım tünelleme yapısının farklı voltajlar altındaki davranışı şematik olarak gösterilmiştir. Uygulanan voltajın etkisiyle kuyu içindeki enerji seviyesi (E_0), elektronların bulunduğu yayıcı bölgedeki Fermi enerjisine (E_F) yaklaşmaya başlar (Şekil 2.4b). Bu enerjinin yayıcı bölgedeki Fermi seviyesiyle hizalandığı anda (tınlaşım durumu), taşıyıcıların geçme olasılıkları bir anda artar (Şekil 2.4c). Uygulanan voltajın biraz daha artırılması durumunda ise tınlaşım durumu bozulur ve geçirgenlik katsayısında düşme olur (Şekil 2.4d).



Şekil 2.4. Bir çift engel tınlaşım tünelleme yapısının farklı voltajlar altındaki iletkenlik bant yapısının şematik gösterimi. (a) voltaj yokken, (b) eşik durumu, (c) tınlaşım ve (d) tınlaşımın yeniden bozulduğu durum. Taralı bölge, Fermi denizine karşılık gelmektedir.

Şekil 2.5’de, 100 Å’luk engel genişliği, 100 meV’luk potansiyel engel yüksekliği ve farklı kuantum kuyu genişliğine (L_2) sahip sistemler için geçirgenlik katsayısının enerjiye göre (uygulanan voltajın elektronun yüküyle çarpımı) değişimi gösterilmiştir [28]. Geçirgenlik katsayısı delta fonksiyonu şeklinde artmakta ve 1’e eşitlendiği noktalar tınlaşım durumlarına karşılık gelmektedir.



Şekil 2.5. Farklı kuyu genişlikleri (L_2) için çift engel tınlaşım tünelleme diyot yapısındaki geçirgenlik katsayısı [28].

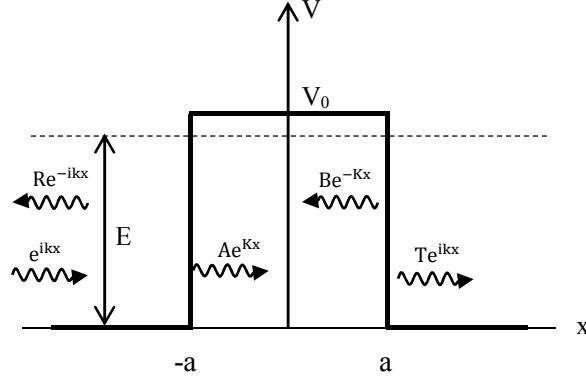
Geçirgenlik katsayısı, yapı içinden akan akım hakkında bilgi vermektedir. Bu değer in büyüklüğü, yapıda kullanılan potansiyel engel yüksekliğine, engel genişliğine, kuyu genişliğine ve aygıtın çalışma sıcaklığına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Taşınım fiziğinin iyi anlaşılması, bu parametrelerin etkilerinin iyi bilinmesine bağlıdır.

2.3 Tınlaşım Tünellemeye Etki Eden Parametreler

Geçirgenlik katsayısı, tınlaşım tünelleme yapıları için önemli bir parametre olmasına rağmen doğrudan ölçülen bir nicelik değildir. Ancak, tınlaşım tünelleme yapısının bu özelliği akım- voltaj (I-V) eğrisinden elde edilebilir [28]. Taşınım fiziğinin iyi anlaşılması için yapıda kullanılan potansiyel engel yüksekliğini ve genişliğini, kuyu genişliğini ve aygıtın çalışma sıcaklığını kuantum mekaniksel olarak incelenmesi gerekmektedir. Bu parametrelerin etkilerinden alt başlıklar halinde kısaca bahsedilecektir.

2.3.1 Engel genişliği ve yüksekliği

Tınlışım tünelleme diyot yapısındaki taşınım fiziğini incelemek için öncelikli olarak engel genişliğinin etkisini, tek boyutta potansiyel engel (bariyer) üzerinden ele alalım.



Şekil 2.6. Potansiyel engelin şematik gösterimi.

Şekil 2.6'da E parçacıkların sahip olduğu enerjiyi, V_0 ise $-a$ ile a noktaları arasındaki engel potansiyelini ve K ise engel içerisindeki dalga sayısını (sönüm sabitini) temsil etmektedir. Aşağıda verilen Schrödinger denklemi (2.2) çözümlenerek parçacığın engel dışındaki ve içindeki dalga fonksiyonları (2.3) elde edilir.

$$\frac{d^2\psi_x}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E - V_0)\psi_x = 0 \quad \text{veya} \quad \frac{d^2\psi_x}{dx^2} + K^2\psi_x = 0 \quad (2.2)$$

Denklem 2.2'nin çözümünden elde edilen dalga fonksiyonları (ψ_x);

$$\begin{aligned} \psi_I &= e^{ikx} + Re^{-ikx} & x < -a \\ \psi_{II} &= Ae^{Kx} + Be^{-Kx} & x < |a| \\ \psi_{III} &= Te^{ikx} & x > a \end{aligned} \quad (2.3)$$

şeklinde ifade edilir [29]. Denklem 2.3’de R yansıma katsayısını ve T geçirgenlik katsayısını temsil etmektedir. Dalga fonksiyonu sürekli bir fonksiyon olmasından dolayı engelin sınır bölgelerinde (2.3)’deki dalga fonksiyonları ve türevleri birbirine eşit olmalıdır. Bu eşitlikler çözüldüğünde geçirgenlik katsayısı,

$$T = e^{-2ika} \frac{2kK}{2kK \cosh(2Ka) - i(k^2 - K^2) \sinh(2Ka)} \quad (2.4)$$

şeklinde elde edilir. Denklem 2.4’de $\cosh^2(x) = 1 + \sinh^2(x)$ eşitliğinden yararlanılarak geçirgenlik olasılığı ($|T|^2$);

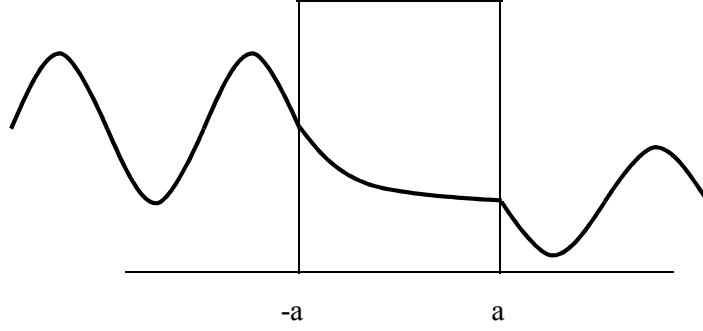
$$|T|^2 = \frac{(2kK)^2}{(k^2 + K^2)^2 \sinh^2(2Ka) + (2kK)^2} \quad (2.5)$$

elde edilir. Geçirgenlik olasılığının limit durumlarını incelediğimizde;

- i. $Ka \gg 1$ çok az geçiş olması (engel genişliğinin fazla olması) durumunda;

$$|T|^2 \rightarrow \left(\frac{4kK}{k^2 + K^2} \right)^2 e^{-4Ka} \quad (2.6)$$

ifadesi elde edilir. Buna göre geçirgenlik katsayısı engel genişliği (a) ile üssel olarak azalma gösterir (Şekil 2.7). Bu etkiyi akım – voltaj (I-V) grafiğinde incelediğimizde, engel genişliği arttıkça tünelleme olasılığı azalacağından akım değerinin azalacağı gözlenir.



Şekil 2.7. Dalga vektörünün engel içinde ve dışındaki hareketinin şematik gösterimi.

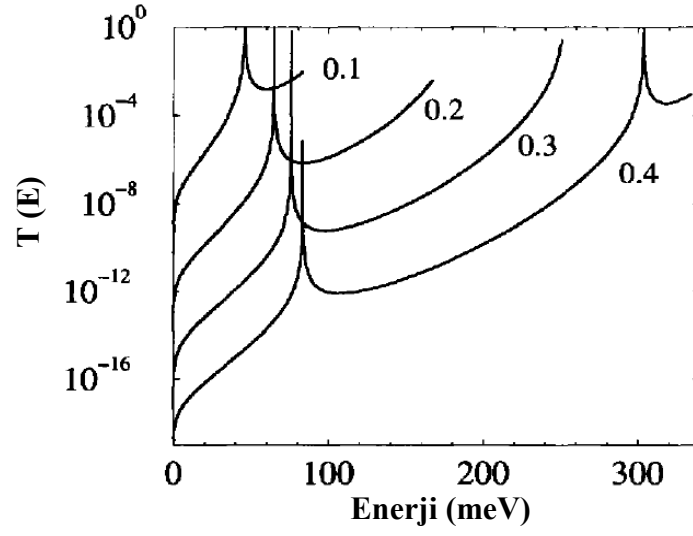
Bu durum çift engel tınlaşım tünelleme yapıları için incelendiğinde, engel genişliği arttıkça tınlaşım tünelleme akım değerinin ve tınlaşım tünelleme akımının görüldüğü voltaj değerinin azalacağı görülür.

ii. Kuantum kuyu yapılarında engel yüksekliği, engelin sahip olduğu potansiyel enerjiye karşılık gelmektedir. Engel yüksekliğinin geçirgenlik katsayısına etkisini (2.5)'de $K^2 = \frac{2m}{\hbar^2} (E - V_0)$ eşitliğini kullanarak yazacak olursak,

$$|T|^2 = \frac{(2k)^2 \frac{2m}{\hbar^2} (E - V_0)}{(k^2 + \frac{2m}{\hbar^2} (E - V_0))^2 \sinh^2(2 \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} (E - V_0)} a) + (2k)^2 \frac{2m}{\hbar^2} (E - V_0)} \quad (2.7)$$

ifadesini elde ederiz. Bu durumda, sinh monoton bir şekilde artan fonksiyon olduğundan geçirgenlik katsayısı, V_0 engel yüksekliği ile monoton bir şekilde azalma gösterir.

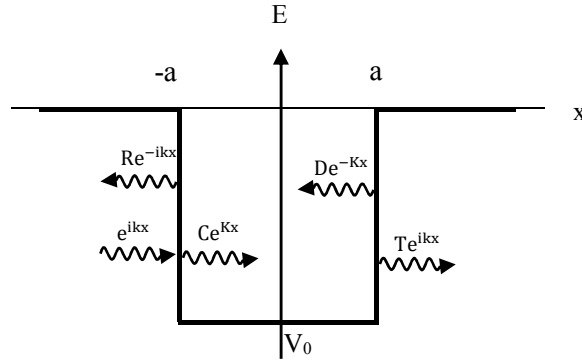
Çift engel tınlaşım tünelleme yapılarına baktığımızda, engel yüksekliği (V_0) arttıkça tınlaşım tünellemenin gerçekleşeceği kuantum kuyu içindeki enerji seviyeleri artacak ve geçirgenlik katsayısının değeri azalacaktır. Bununla birlikte, sınırlamanın olduğu diğer enerji seviyelerinden tınlaşım tünelleme akımı gözlenebilecektir. Şekil 2.8'de farklı engel yüksekliğine sahip çift engel tınlaşım tünelleme diyotlarına ait geçirgenlik katsayısının grafiği gösterilmiştir.



Şekil 2. 8. 100Å Ga_{1-x}Al_xAs / 50Å GaAs / 100Å Ga_{1-x}Al_xAs yapısına sahip tınlaşım tünelleme diyotu için enerjinin bir fonksiyonu olarak geçirgenlik katsayısı grafiği [28].

2.3.2 Kuantum kuyu genişliği

Tınlaşım tünelleme diyot yapısındaki taşınım fiziğini etkileyen diğer etken ise kuantum kuyu genişliğidir. Bu etkiyi, Şekil 2.9'da gösterilen tek boyutlu potansiyel kuyu problemi üzerinden inceleyelim.



Şekil 2. 9. Potansiyel kuyunun şematik gösterimi.

Şekil 2.9'da gösterilen V_0 , kuyu potansiyelidir ve kuyunun en üst seviyesi sıfır potansiyel olarak kabul edildiği için negatif bir değerdir. Kuyu problemini

çözmek için sınır koşullarında Schrödinger denklemini (2.2) sağlayan dalga fonksiyonlarının bulunması gerekir.

$$\begin{aligned}
 k &= \sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}} & V_{(x)} &= 0; x > |a| \\
 K &= \sqrt{\frac{2m(E+V_0)}{\hbar^2}} & V_{(x)} &= -V_0; x < |a|
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

Denklem 2.8'deki kuyu dışındaki dalga sayısı ve içindeki dalga sayısı eşitlikleri kullanılarak (2.9)'daki taşıyıcıların dalga fonksiyonları aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned}
 \psi_x &= e^{ikx} + R e^{-ikx} & x < -a \\
 \psi_x &= C e^{iKx} + D e^{-iKx} & x < |a| \\
 \psi_x &= T e^{ikx} & x > a
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

Bu dalga fonksiyonları ve türevleri, kuyu sınırlarında sürekli olduğundan, geçirgenlik katsayısı,

$$T = e^{-2ika} \frac{2kK}{2kK \cos(2Ka) - i(k^2 + K^2) \sin(2Ka)} \tag{2.10}$$

ifadesi elde edilir. Buna göre, $E \gg V_0$ durumunda neredeyse hiç yansıma olmaz (geçirgenlik değeri $\rightarrow 1$) ve $E \rightarrow 0$ durumunda geçirgenlik değeri de 0'a yaklaşır.

Ayrıca denklem (2.1)'e bakıldığında, kuyu içinde oluşan kesikli enerji seviyeleri kuyunun genişliği ile ters orantılı olduğu görülmektedir. Buna göre, çift engel tınlaşım tünelleme yapılarında kuantum kuyu genişliği arttıkça kuyu içindeki enerji seviyeleri kuyu malzemesinin yığın (bulk) değerine yaklaşacağından tınlaşım tünelleme olayı daha erken voltajlarda gözlenecektir. Hatta kuyu genişliğinin artmasıyla diğer enerji seviyelerinden de tınlaşım tünelleme olayı gözlenebilir hale gelecektir.

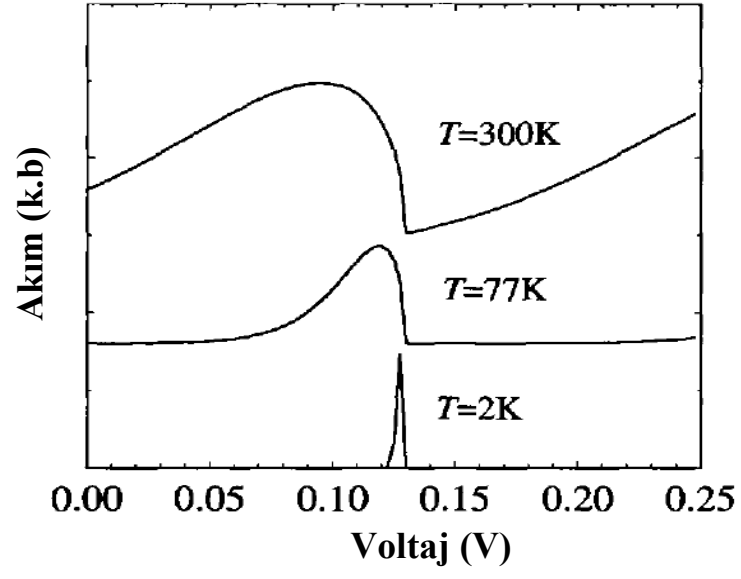
2.3.3 Sıcaklık

Sıcaklık, yapısal bir etki olmamasına rağmen, taşınım fiziğine ve saçılma oranına etkisinden dolayı aygıt performansını önemli derecede etkileyen bir parametredir [30].

Tınlaşım tünel aygıtlarına elektrik alan (gerilim) uygulandığında taşıyıcı yükler engele doğru hareket eder ve kuyu içindeki enerji seviyelerinde ΔE kadar kayma olur. Bu kayma sonucunda kuyu içindeki enerji seviyeleri ile fermi enerji seviyesi aynı hizaya geldiğinde tınlaşım olayı gözlemlenir. Bu taşıyıcı yükler Fermi Dirac dağılımına sahiptir (2.11).

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{[E - (E_f - \Delta E)]}{kT}}} \quad (2.11)$$

Burada E enerji, E_f fermi enerjisi ve T de sıcaklığı temsil etmektedir. Düşük sıcaklıklarda, taşıyıcıların fonon ile etkileşimi azalmakta ve taşıyıcılar elektrik alan altında Fermi Dirac dağılımından dolayı bant minimumuna yakın engel önünde bulunan enerji uzayının küçük bir bölümünde birikmektedirler. Elektrik alan arttıkça, taşıyıcıların yük dağılımından dolayı akım – voltaj grafiğinde tınlaşım durumunda akımda keskin bir artma olur. Yüksek sıcaklıklarda, taşıyıcıların fonon ile etkileşimi arttığından, taşıyıcıların dağılımı elektrik alan altında genişlemektedir. Bu nedenle tınlaşım durumunda akım – voltaj grafiğinde gözlenen akım artışı keskinliğini kaybetmekte ve geniş bir voltaj aralığında kendini göstermektedir (Şekil 2.10).



Şekil 2. 10. 100\AA $\text{Ga}_{0,8}\text{Al}_{0,2}\text{As}$ / 50\AA GaAs / 100\AA $\text{Ga}_{0,8}\text{Al}_{0,2}\text{As}$ yapısına sahip tınlaşım tünelleme diyotunun farklı sıcaklıklarda akım – voltaj grafiği.

3. DENEYSEL YÖNTEMLER

Bu bölümde, tez kapsamında çalışılan ve karakterizasyon sonuçlarının ayrıntılı bir şekilde sonraki bölümde tartışıldığı örneklerin yapılarından, aygıt üretiminden ve karakterizasyonlarında kullanılan deneysel yöntemlerden kısaca bahsedilecektir.

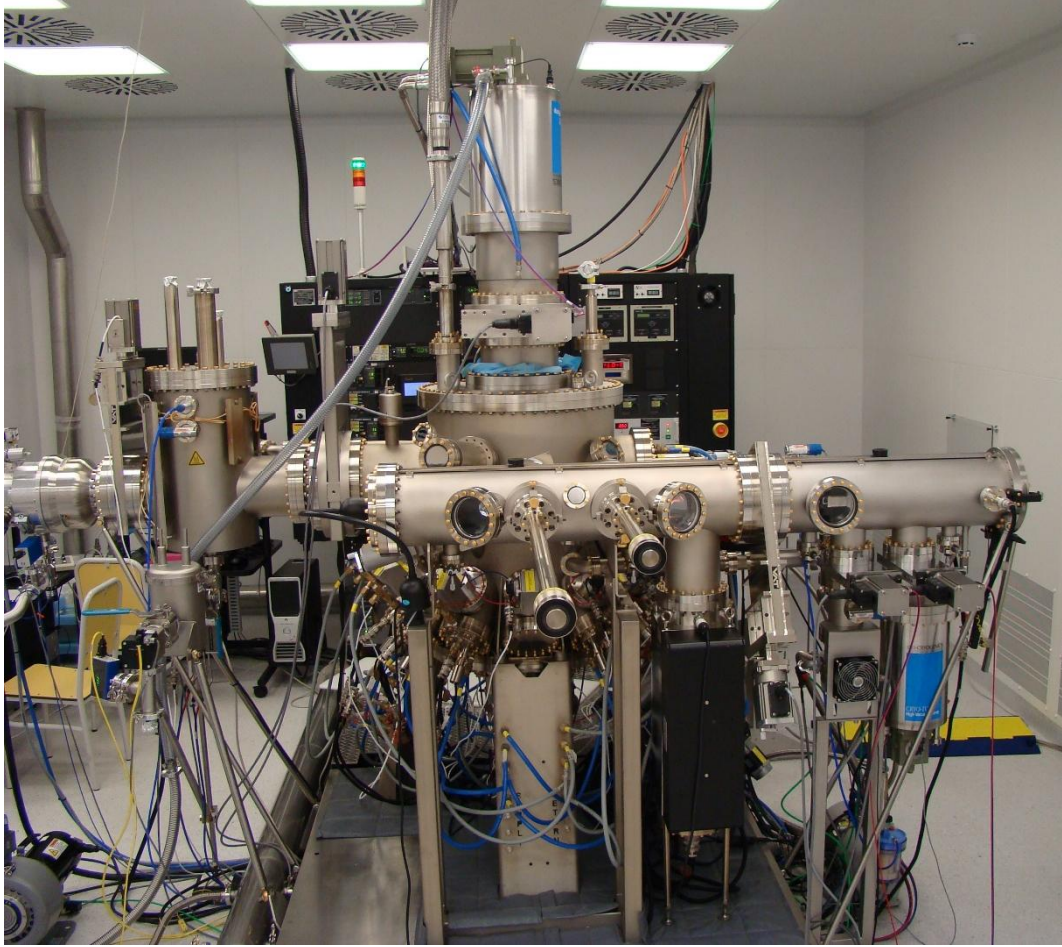
Çift engelli kuantum kuyu yapısındaki akım mekanizmasına engel genişliği, kuyu genişliği ve sıcaklığın etkilerini belirlemek amacıyla DBRT diyot yapıları büyütülmüştür. Büyütülen örneklerin aygıt üretimleri yapılarak karakterizasyon aşamasına hazır haline getirilmiş ve optoelektronik olarak incelenmiştir.

DBRT diyot yapılarının epitaksiyel olarak büyütülmesi, aygıt üretimleri ve opto-elektronik ölçümlerinin tamamı Anadolu Üniversitesi Fizik Bölümü, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Tez kapsamında çalışılan bu yapıların bir kısmının aygıt üretimlerindeki metal kaplama işlemi ODTÜ Fizik Bölümü'nde bir kısmının ise ASELSAN Ankara-Akyurt tesislerinde yapılmıştır. Tüm yüzeyi metal kaplanmış bu örnekler, sonrasında laboratuvarımıza getirilmiş ve metal kaldırma işlemi (lift off) yapılarak fabrikasyon sürecine devam edilmiştir.

3.1 Epitaksiyel Büyütme

MBE sistemi, yüksek vakum altında hedef altaşlar üzerine atomik mertebede ve hassasiyette epitaksiyel tabakalar oluşturma imkânı sağlayan yarıiletken kristal büyütme tekniğidir. Bu teknikte, kaynak malzeme olarak kullanılan elementler çok yüksek saflıktadır (örn: Ga %99,99999 ve As %99,999995) ve büyütme işlemi çok yüksek vakum ortamında gerçekleştirilir. Kaynak malzemeler içinde buldukları ve kullanılan malzemeye özel tasarlanmış efüzyon hücrelerinden buharlaştırılarak, hedef altaş üzerine gönderilerek altaş ile aynı kristal yapıda ve yüksek kalitede ince film üretilmesi sağlanır.

Tez kapsamında çalışılan örneklerin büyütülmesi Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda kurulu olan ve Şekil 3.1'de gösterilen Veeco Gen20 MBE sisteminde yapılmıştır. Üç vakum odalı (yükleme, hazırlık ve büyütme hazneleri) bu MBE sistemi $\sim 5 \times 10^{-10}$ Torr taban basıncına sahiptir ve 1 atom-katmanı/saniye (1 ML/sn) büyütme hassasiyetiyle III-V grubu tek kristal yarıiletken tekli veya çoklu katmanların büyütülmesinde kullanılmaktadır.



Şekil 3. 1. Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda kurulu MBE sistemi.

Tez kapsamında hedeflenen yapıların büyütülmesi için MBE sisteminde yapılan büyütme işleminde kullanılacak temel parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir: GaAs ve Al(Ga)As malzemeleri için büyüme oranları, Al alaşım oranı ve büyütme işlemi sırasında kullanılacak alttaş sıcaklığı öncelikli olarak belirlenmesi gereken parametrelerdir. MBE sisteminde her bir tabakanın

büyütülmesi için GaAs ve AlAs büyüme sürelerinden yola çıkılarak farklı teknikler kullanılarak ölçülen tabaka kalınlıkları yardımıyla büyüme oranları belirlenmiştir. Böylece, Al hücre sıcaklığına karşı büyüme oranı yardımıyla $Al_xGa_{1-x}As$ malzemesi için her bir hücre sıcaklığına karşılık gelen Al alaşım oranları (x) belirlenmiştir.

GaAs ve $Al_xGa_{1-x}As$ malzemeleri için büyüme oranları ve alttaş sıcaklıkları belirlendikten sonra tasarlanan GaAs/AlGaAs çift engel tınlaşım tünelleme yapıları büyütülmüştür. Büyütülen örneklerin Tablo 3.1’de genel yapıları verilmiştir. AS-2 numaralı örnek, kuantum kuyu merkezinin Si atomlarıyla düşük miktarda katkılı olduğu ve safsızlık atomları üzerinden tınlaşım tünelleme olayının görülmesi amacıyla tasarlanan örnektir. AS-1 ise, aynı yapının katkısız olarak büyütüldüğü kontrol örneğidir. Tınlaşım tünellemenin bağlı olduğu parametrelerin ayrıntılı olarak çalışılabilmesi için, elde edilen sonuçlar doğrultusunda farklı kuyu ve engel genişliğine sahip örnekler tasarlanmış ve büyütülmüştür. Kuantum kuyuların katkısız olarak büyütüldüğü ve Tablo 3.1’de verilen genel yapıya sahip olan bu örneklerin AlGaAs engel ve GaAs kuyu genişlikleri Tablo 3.2’de verilmiştir. Yapılacak elektriksel ölçümlerde bir kontrol noktası olması bakımından yapılar, asimetrik engel genişliklerine sahiptir. Örneklerden elde edilen sonuçlar sonraki bölümde ayrıntılı olarak verilmiştir.

Tablo 3.1. Çift engel tünleşim tünelleme için genel yapı.

Hedef Kalınlık	Katman	Katkı (cm ⁻³)
400	GaAs: Si	1,0x10 ¹⁸
100	GaAs: Si	5,0x10 ¹⁶
20	GaAs	
a	Al _{0,4} Ga _{0,6} As	
b	GaAs: Si	
c	Al _{0,4} Ga _{0,6} As	
20	GaAs	
100	GaAs: Si	5,0x10 ¹⁶
700	GaAs: Si	1,0x10 ¹⁸
400	GaAs destek katmanı	
SI GaAs Alttaş		

Tablo 3.2. Çift engel tünleşim tünelleme çalışmaları için büyütülen yapılar.

Örnek Kodu	AlGaAs Engel Genişliği (a/c nm)	GaAs Kuyu Genişliği (b nm)
AS-1	5 / 6	6
AS-2	5 / 6	6 (δ-katkılı)
AS-3	5 / 5,8	4
AS-4	5 / 6	6
AS-5	5 / 6	8
AS-6	3 / 10	6
AS-7	5 / 10	15

3.2 Aygıt Üretimi

Büyütülen yapıların optoelektronik karakterizasyonlarının yapılabilmesi için örnekler elektrik bağlantılarının yapılabilirdiği aygıtlar haline getirilmelidir. Aygıt üretim basamakları sırasıyla alt başlıklar halinde aşağıda kısaca açıklanmıştır.

NUMUNE TEMİZLEME: Numune yüzeyinde oluşan organik kirler, toz ve doğal oksit tabakası aygıtın performansını etkileyen önemli kusurlardır. Numune yüzeyindeki organik kirleri, tozları, daha sonraki aşamalarda bahsedilecek olan fotorezist kalıntılarını temizlemek için aseton ve asetonun yüzeyde oluşturduğu kirliliği temizlemek için de izopropanol (alkol) oda sıcaklığında veya duruma göre ısıtılarak kullanılır. Numune yüzeyindeki doğal oksit tabakasını kaldırmak için ise numune seyreltilmiş HCl (hidroklorik asit) içine daldırılır. Bu aşamalardan sonra numune, saf (deiyonize) su ile yıkanır/durulanır ve sonrasında azot gazı (N₂) ile kurutulur.

FOTOLİTOGRAFI: Morötesi (ultraviolet, UV) veya derin morötesi (deep ultraviolet, DUV) ışık kaynağı kullanarak bir maske üzerindeki aygıt modelini numune üzerine aktarma işlemidir. Bu basamak, alt başlıklara ayrılabilir:

Yüzey Kaplama ve Hafif Isıtma: Yüksek enerjili ışığa (UV) duyarlı organik bir malzeme olan “fotorezist” (AZ5214E), döner kaplayıcı (Laurell WS-400BZ-6NPP-spin coater) ile numune yüzeyine düzgün dağılacak şekilde kaplanır. Fotorezistin örnek yüzeyine daha iyi tutunması ve yüzeydeki nemin uzaklaştırılması için numuneler düşük sıcaklıkta ısıtılır(hafif ısıtma).

Maske Hizalama ve Işınlama: Maske hizalayıcı (MIDAS, MDA-400M-6) cihazı kullanılarak, numune yüzeyine aktarılacak maske üzerindeki desen ile numune arasındaki fiziksel hizalamanın yapılması ve örneğin UV ışığa maruz bırakılması işlemidir.

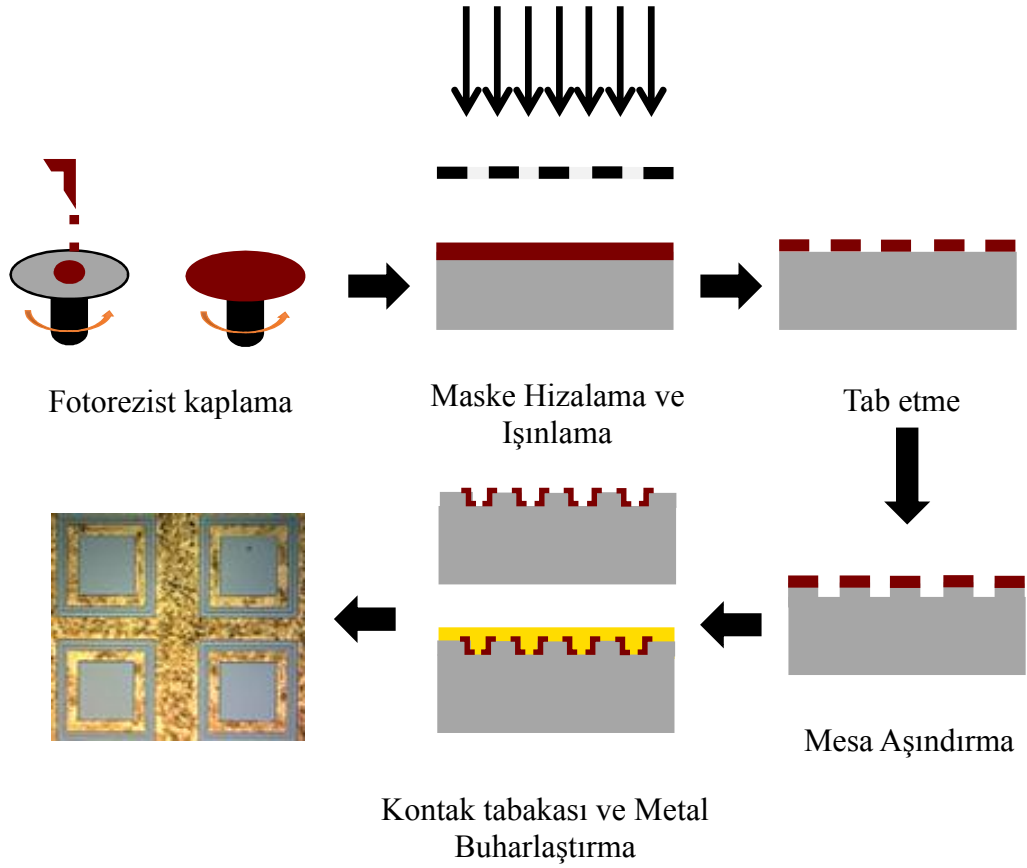
Tab Etme ve Sert Istma: Yüksek enerjili ışığa maruz kalan fotorezist bölümlerinin, uygun bir çözeltili (developer, AZ400K:H₂O) içine konulduğunda gizli aygıt modelinin numune yüzeyinde belirmesi işlemidir. Sonrasında, ışık görmeyen fotorezistin numune yüzeyine daha iyi tutunması ve kimyasal aşındırmaya karşı direnç kazanması için numuneler öncekine kıyasla daha yüksek sıcaklıklarda (sert ısıtma) ve daha uzun süre boyunca ısıtılır.

ISLAK AŞINDIRMA: Sıvı kimyasalların kullanılmasıyla numune yüzeyinde meydana gelen kimyasal tepkimelerle yüzeyden belli miktarda malzeme kaldırılmasıdır. Aşındırma için tercih edilen çözeltiler, numune malzemesi ve yapısına göre farklılık gösterir. Tab etme işleminde fotorezistin numune yüzeyinden kalkan kısımlar ile etkileşime giren kimyasal çözelti, numuneyi aşındırır ancak fotorezistli kısma zarar vermez. Numune yüzeyindeki fotorezist aseton içerisinde çözülür ve böylece aygıt üretimi sürecinde masatepe (mesa) yapılar oluşturulmuş olur.

METAL KAPLAMA: Aygıtların elektriksel bağlantılarını yapabilmek için ihtiyaç duyulan omik kontakların oluşturulma işlemidir. Yeni bir fotolitografi basamağıyla masatepelere oluşan numune yüzeyi tekrar fotorezistle kaplanarak düşük sıcaklıklarda ısıtılır ve metal kaplaması istenen kısımlar (kontakt tabakası) açıkta kalacak şekilde uygun maske yardımı ile yüksek enerjili ışığa maruz bırakılır. Yüksek enerjili ışığa maruz bırakılan yerlerin kaldırılması için numune tab edilir. Metal buharlaştırma sistemi içinde tüm numune yüzeyi istenilen metal ile kaplandıktan sonra numune yüzeyindeki kontakt tabakalarının ortaya çıkması için *lift-off* adı verilen işlem yapılır. Bu işlemde numune aseton içerisinde bekletilerek metalin altında kalan fotorezist kaldırılır. Yüzeyde kalan metalin yapıya nüfuz etmesi için numune çabuk ısıtılma cihazında yüksek sıcakta tavllanır.

PAKETLEME VE TEL BAĞLAMA: Metal kaplanan numune, düşük sıcaklıklara dayanıklı ve elektriksel yalıtkan olan bir yapıştırıcı yardımıyla 16 ayaklı paket (DIP) üzerine tutturulur. Paket üzerine tutturulan numune yüzeyinden alt ve üst kontakt bölgelerine metal tel bağlantıları yapılarak ölçüme hazır hale getirilir.

Basamaklar halinde anlatılan aygıt üretimi şematik olarak Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Tez kapsamında büyütülen yapılar üzerinde, yapının düzgünlüğünü ve üretimin kalitesini anlamak için farklı büyüklüklerde kare masatepeler oluşturulmuş ve aygıt üretim aşamalarında yapılanlar kısaca Tablo 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3. 2. Aygıt üretim basamaklarının şematik gösterimi.

Tablo 3.3. Tez kapsamındaki örnekler için yapılan aygıt üretme işlemleri.

	NUMUNE TEMİZLEME	5 dk Aseton 5 dk İzopropanol 80°C HCl:H₂O (1:1) ~30 sn	
FOTOLİTOGRAFI	Şekil 3. 3. Yü zey Kaplama	45 sn 5000 rpm	AZ5214E
	Hafif Isıtma	1dk 110°C	
	Maske Hizalama	BÜDAM-KÜDAM MESA *	
	Işnlama	9 sn	
	Tab Etme	AZ400K:H₂O (1:4) ~20 sn	
	Sert Isıtma	5 dk 120°C	
ISLAK AŞINDIRMA	Mesa Aşındırma	H₂SO₄ : H₂O₂ : H₂O (1:8:160)	
	Derinlik	1000 nm	
METAL KAPLAMA	Yüzey Kaplama	45 sn 5000 rpm	AZ5214E
	Hafif Isıtma	1 dk 110°C	
	Kontak Tabakası	BÜDAM – KÜDAM Ü_A_K_HALKA *	
	Işnlama	9 sn	
	Tab Etme	AZ400K:H₂O (1:4) ~20 sn	
	Metal Buharlaştırma	i. Ni:Ge-Au: Au (350:1000: 500 Å)	
		ii. Ni:Ge: Au (250:550:800 Å)	
	Lift-off	Aseton	
Çabuk Isıl İşlem	425°C 60 sn		

* Anadolu Üniversitesi Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda kullanılan maskedeki farklı katman isimleri.

- i. ODTÜ Fizik Bölümü'nde ve ASELSAN Ankara-Akyurt tesislerinde yapılan metal kaplama işlemi.
- ii. Anadolu Üniversitesi Fizik Bölümü, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda yapılan metal kaplama işlemi.

3.3 Optoelektronik Karakterizasyon Yöntemleri

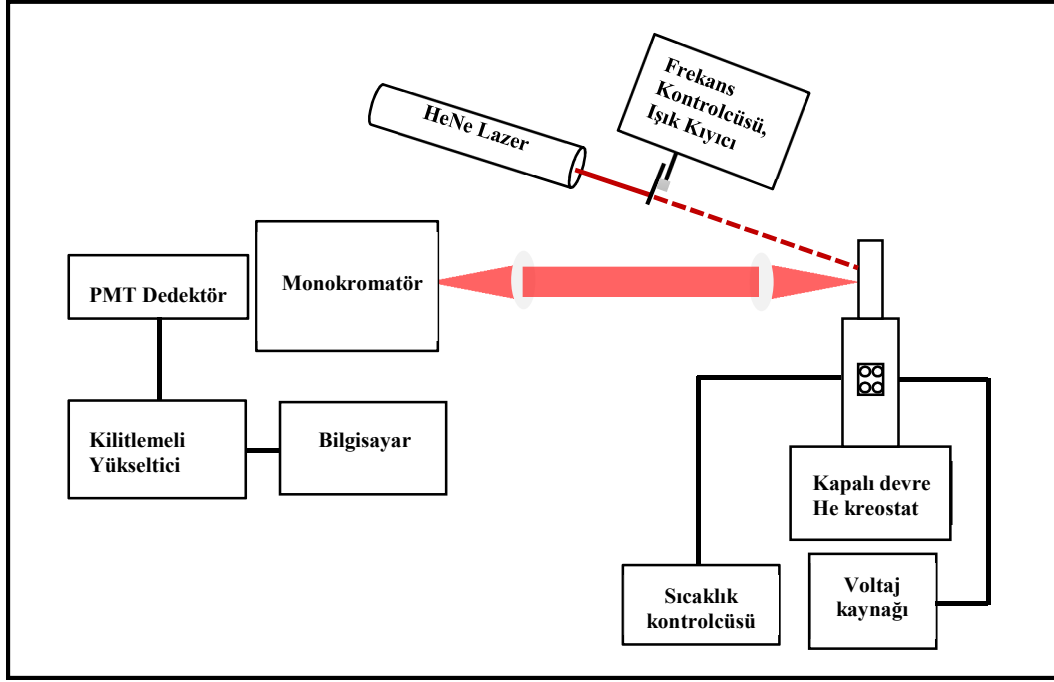
Yüksek kalitede büyütülen yapıların, ham ve işlenmiş hallerinin karakterizasyonu farklı yöntemler kullanılarak yapılmıştır. Tez kapsamında kullanılan ve sonuçları sonraki bölümde verilen numunelerin optoelektronik karakterizasyon yöntemlerinden alt başlıklar halinde aşağıda kısaca bahsedilmiştir.

3.3.1 Fotolüminesans (PL) ölçümü

Büyütülen yapıların hem örnek kalitesinin anlaşılması hem de kuantum kuyu içindeki enerji seviyesinin varlığının anlaşılabilmesi için fotolüminesans (PL) ölçümleri yapılmaktadır. Temel olarak PL, değerlik bandından iletkenlik bandına uyarılan taşıyıcıların soğurdukları enerjiyi ışına yaparak denge durumuna gelme sürecidir. PL ölçümü, yapıya zarar vermeyen bir karakterizasyon yöntemidir.

Kuantum kuyu (Quantum Well, QW) yapıların karakterizasyonu için PL oldukça güçlü bir araçtır. Bant kaymaları (band offsets), eksiton bağlanma enerjileri, trionlar, çift eksitonlar (biexcitons), kuantum sınırlı Stark etkisi, pik genişlemesi (homogeneous broadening) gibi kuantum kuyularda birçok içsel etkilere PL ölçümü ile erişilebilmektedir. Ayrıca, PL ölçümleri ile QW sisteminin yapısal bozuklukları, kusurlar ve yeniden birleşme ile ilgili bilgi almak mümkündür [31].

Bu tez kapsamında kurulan PL ölçüm düzeneği Şekil 3.3’de gösterilmiştir. PL ölçümlerinde, 632 nm dalgaboylu ve 35 mW gücündeki HeNe lazer demeti, ölçüm sonuçlarındaki gürültü seviyesini azaltmak için belirli bir frekansta çalıştırılan ışık kısıyıcısından (chopper) geçirilmiştir. Daha sonra lazer, kapalı sistem Helyum (He) kreostat içindeki numune üzerine optik mercekle (L_1) yardımı ile odaklanmıştır. Bu sayede oluşan uyarılmış elektronların başlangıç seviyesine geçişinde saldırdığı ışınım (PL sinyali) optik mercekler (L_2 , L_3) yardımı ile monokromatöre odaklanmış ve monokromatörde dalgaboylarına ayrılarak, 80 K’de çalışan foton çoğaltıcı tüp (photomultiplier tube, PMT: Hamamatsu R5509-72) dedektöre gönderilmiştir. Dedektörün çıkışı, optik kısıyıcı ile aynı frekansta ölçüm yapılmasını sağlayan kilitlemeli yükselticiye (lock-in amplifier: SR850) bağlanmış ve LabView’da yazılmış bir programla sinyalin dalgaboyuna bağlı olarak değişimi kaydedilerek PL spektrumu elde edilmiştir.



Şekil 3.3. Numunelerin ölçümünde kullanılan PL düzeneği, çerçeve içinde kalan bölüm voltaj bağımlı fotoluminesans (E-PL) ölçümlerinde kullanılmıştır.

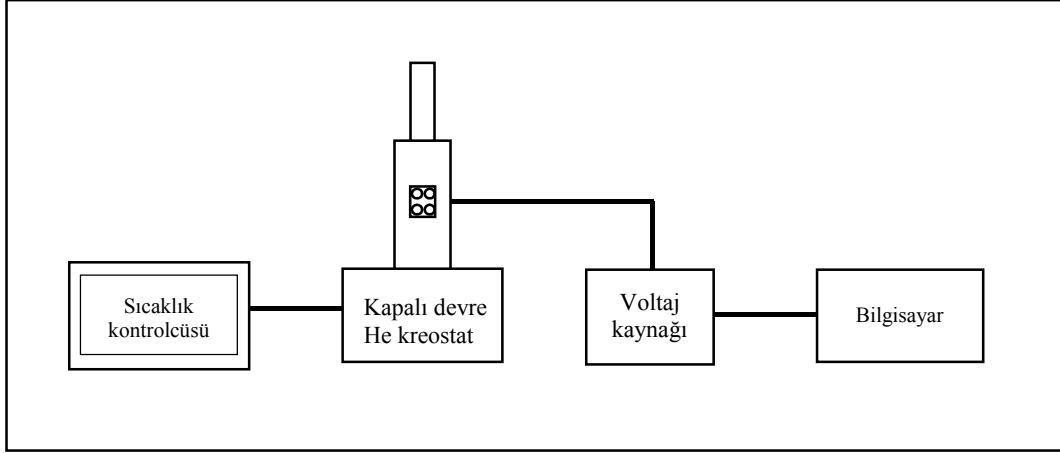
PL ölçümlerinde, kuantum kuyu içindeki taşıyıcıların sayısı çok az olduğundan PL sinyal şiddeti azdır. Ancak voltaj uygulandığında, kuyu içine akan taşıyıcı sayısı arttığından PL sinyalinin şiddeti de artar. Örneklerin voltaj altındaki davranışlarının incelenebilmesi için, voltaj bağımlı fotoluminesans (elektro fotoluminesans: E-PL) düzeneği kurularak ölçümler yapılmıştır.

3.3.2 Akım- Voltaj (I-V) ölçümü

Akım-voltaj (I-V) ölçümü, yük geçirgenliği ve dağılımı hakkında bilgi verir. Bölüm 2’de bahsedilen, tınlaşım tünelleme olayı için önemli olan geçirgenlik katsayısı I-V ölçümlerinden yararlanılarak elde edilmektedir. Ayrıca bu ölçüm, çift engel tınlaşım tünelleme diyotunun kuyu genişliği, engel genişliği gibi numune yapısı hakkında da bilgi vermektedir.

Bu tez kapsamında, aygıt haline getirilen yapıların akım-voltaj karakteristiklerine bakılmış ve tınlışım tünelleme akımının varlığı gözlemlenmiştir. Farklı büyüklüklerdeki masatepelerden elde edilen akım değerleri, akım yoğunluğuna çevrilerek hem büyütmenin hem de fabrikasyon aşamaların doğruluğu onaylanmıştır.

Şekil 3.4, akım-voltaj ölçümlerinde kullanılan deney düzeneğini göstermektedir. I-V ölçümlerinde aygıt haline getirilen numune, kapalı devre He kreostat (veya azot soğutmalı kap) içine konulmuştur. Numunelerin, kızılötesi ışınımı görmesini engellemek için kreostat içindeki numune tutucu ile kreostat dış kılıfı arasına radyasyon kalkanı konulmuştur. Ölçümlerde numunenin sıcaklığının ayarlanabilmesi için sıcaklık kontrolcüsü Lakeshore 331, ve voltaj kaynağı olarak ise Keithley 2635 cihazları kullanılmıştır. Elde edilen veriler LabView’da yazılan program ile kaydedilmiştir.



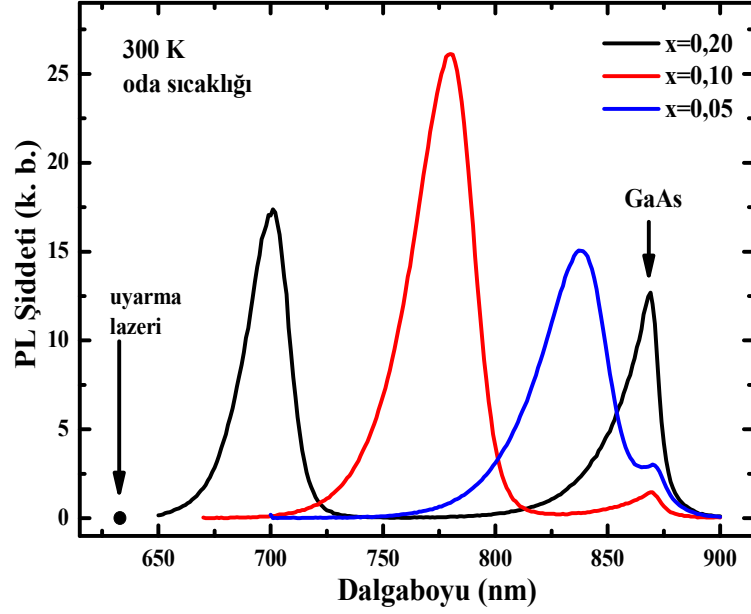
Şekil 3.4. Tınlışım tünelleme mekanizmasını anlamak için kurulan I-V ölçüm düzeneği.

4. GaAs/Al_xGa_{1-x}As ÇİFT ENGEL TINLAŞIM TÜNELLEME YAPILARININ KARAKTERİZASYON

Bu bölümde, tez kapsamında büyütülen yapıların optoelektronik ölçüm sonuçlarından bahsedilecektir. Değerlendirmelerde kullanılan ve yapılara ait hesap işlemleri Doç. Dr. Hasan Yıldırım tarafından gerçekleştirilmiştir.

Tez kapsamında önerilen yapıların büyütülmesi için öncelikle MBE sisteminde yapılan büyütme işleminde kullanılacak temel parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. GaAs ve Al(Ga)As malzemeleri için büyüme oranları, Al (Alüminyum) alaşım oranı ve büyütme işlemi sırasında kullanılacak alttaş sıcaklığı öncelikli olarak belirlenmesi gereken parametrelerdir. MBE sisteminde her bir tabakanın büyütülmesi için GaAs ve AlAs büyüme sürelerinden yola çıkılarak farklı teknikler kullanılarak ölçülen tabaka kalınlıkları yardımıyla büyüme oranları ve kullanılan hücre sıcaklığına karşılık gelen Al alaşım oranları (x) belirlenmiştir. Al alaşım oranının belirlenmesinde temel olarak x-ışını kırınımı sallantı eğrisi (XRD-RC) ve fotoluminesans (PL) ölçüm teknikleri kullanılmıştır. Bu yapılara ait büyütme ve parametrelerin belirlenmesi çalışmaları ayrıntılı olarak Güven Korkmaz'ın tez çalışmasında yer alacaktır [32].

Şekil 4.1'de farklı Al alaşım oranlarına sahip AlGaAs tabakalardan oda sıcaklığında elde edilen PL ölçüm sonuçları örnek olarak gösterilmiştir. Grafikte 870 nm dalgaboyunda görünen sinyal, GaAs alttaştan kaynaklanmaktadır. 837, 780 ve 701 nm dalgaboylarında (1,48 eV, 1,59 eV, ve 1,77 eV) görünen sinyaller, sırasıyla %4,5, %13,3 ve %27,6 Al oranına sahip AlGaAs tabakasından gelmektedir. Al_xGa_{1-x}As malzemesinde x-alaşım değeri arttıkça malzemenin yasak bant aralığı arttığından, buna karşılık gelen PL sinyali de daha küçük dalgaboylarına doğru kaymaktadır. PL deney düzeneğinde numuneleri uyarmak için 632 nm dalga boylu HeNe lazer kullanıldığından, uyarma enerjisi, yüksek Al alaşım oranına sahip yapılar için kullanışlı olmamıştır. PL sinyali, uyarma dalgaboyuna yaklaştıkça lazerin şiddeti, numuneden gelen PL sinyaline kıyasla daha kuvvetli hale gelmekte dolayısıyla uyarma enerjisi yetse de pratik olarak ölçüm alma şansı kaybolmaktadır. Dolayısıyla, daha yüksek Al alaşım oranındaki Al_xGa_{1-x}As katmanlarda PL ölçüm yöntemi kullanılamamıştır.

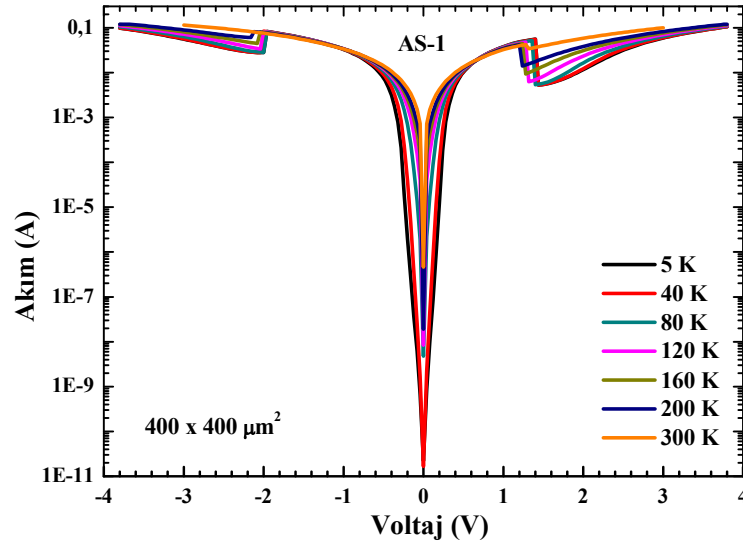


Şekil 4.1 Al alaşım oranının (x) artmasıyla PL ölçümünde $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ sinyalinin değişim grafiği.

Kalibrasyon örnekleri yardımıyla GaAs ve $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ malzemeleri için büyüme oranları ve alttaş sıcaklıkları belirlendikten sonra önceden tasarlanan ve Tablo 3.2’de ayrıntıları verilen GaAs/AlGaAs çift engel tınlaşım tünelleme yapıların büyütülmesine başlanmıştır. İlk aşamada, AS-1 ve AS-2 numaralı çift engel tınlaşım tünelleme diyotları %40 hedef Al alaşımına sahip AlGaAs engel yüksekliği olacak şekilde büyütülmüştür. AS-2 numaralı örneğin kuyu merkezinde δ -katkılama yapılmış ve ölçüm sonuçları ayrıntılı olarak Bölüm 5’de verilmiştir. AS-1 numaralı örnek ise karşılaştırma amacıyla aynı koşullarda büyütülen, kuyu içinde katkı bulunmayan referans örneğidir.

Öncelikle AS-1 kodlu DBRT diyot numunesinden kuyu içindeki enerji seviyeleri üzerinden tınlaşım tünelleme akımının geçmesi gözlenmeye çalışılmıştır. Tünelleme akımının varlığını anlamak için yapılar asimetrik olarak büyütülmüştür: kuyuyu çevreleyen engellerden bir tanesi 5 nm diğeri ise 6 nm genişliğindedir. Ayrıntıları Tablo 3.3’de verilen aygıt üretim işlemleriyle farklı büyüklüklerde mesa yapıları oluşturulmuş ve ölçüme hazır hale getirilmiştir.

AS-1 numaralı örneğe ait sıcaklık bağımlı akım-voltaj ölçüm sonucu Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Grafikte -2V ve +1,2V değerlerinde görülen akım şiddetindeki düşüşler tünelleme sonrasındaki tınlaşım durumunun bozulmasından kaynaklanmaktadır. Bu karakterlerin farklı voltaj değerlerinde gözlenmesinin sebebi numunenin asimetrik yapıya sahip olmasıdır. Pozitif voltaj bölgesinde, akım ilk olarak 6 nm'lik engelden geçmek durumunda olduğundan, kuyu içindeki enerjinin engel öncesindeki enerjiye eşitlenebilmesi için daha küçük bir voltaj değerine ihtiyaç vardır. Benzer şekilde, negatif voltaj bölgesinde ise ilk engel 5 nm olduğundan aynı enerji bükülmesinin gözlenmesi için yapıya daha fazla voltaj uygulanması gerekmektedir. Akım-voltaj (I-V) eğrisinde görünen bu karakterler, kuyu içindeki enerji seviyesi üzerinden tünellemenin gerçekleştiğini göstermektedir (Şekil 4.2).

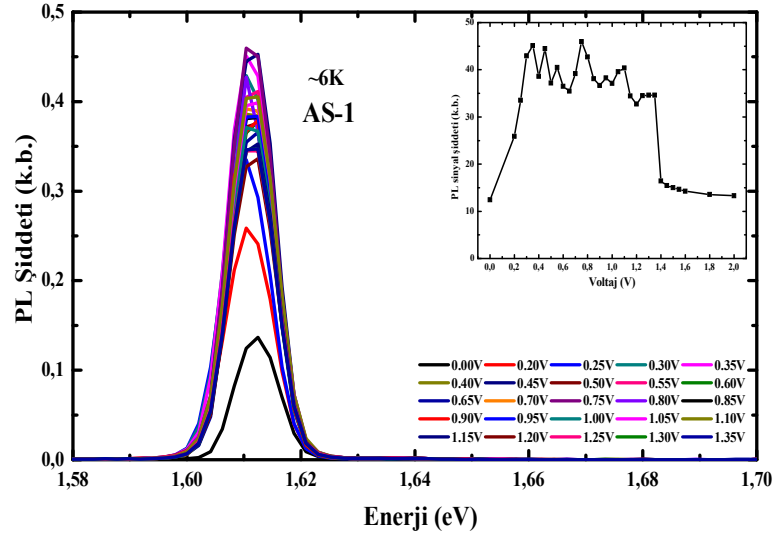


Şekil 4.2 AS-1 numaralı örneğin sıcaklık bağımlı I-V ölçüm sonucu.

Yukarıda gözlenen (Şekil 4.2) karakterlerin, kuantum kuyu içindeki enerji seviyesinden olduğuna netlik kazandırmak için AS-1 örneği üzerinden voltaj bağımlı fotoluminesans (E-PL) ölçümü yapılmıştır (Şekil 4.3). Bu numune yapısında tek kuantum kuyu olduğu için kuyu içindeki enerji seviyesinden gelen PL sinyalinin (~1,61 eV) şiddeti, GaAs kontak bölgesinden gelen (>1,55 eV) sinyal şiddetine kıyasla oldukça küçüktür. Bunun sebebi kuantum kuyu içindeki taşıyıcıların sayısının çok az olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak voltaj

uygulayarak, kuyu içine akan taşıyıcı sayısını arttırmış oluruz ve bu da PL sinyalinde artışa sebep olur.

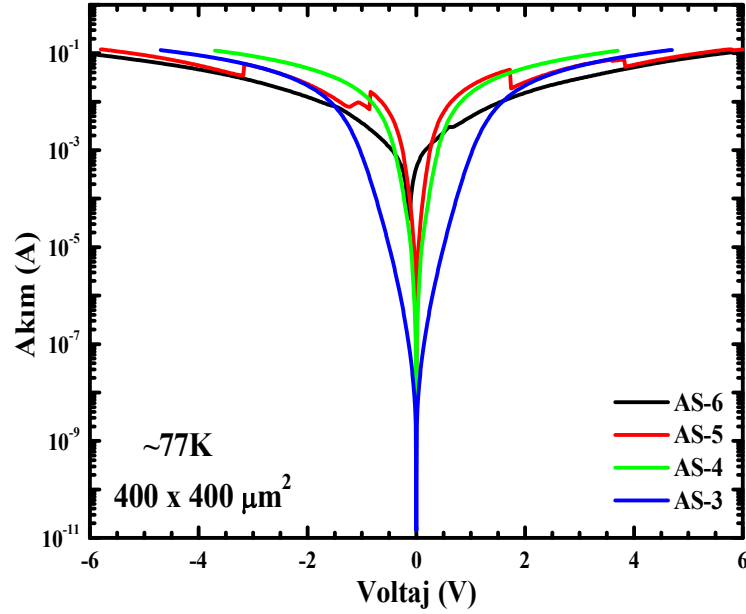
Yapı üzerine voltaj uygulanmadığı zaman kuantum kuyu içindeki taşıyıcıların sayısı çok az olduğundan $\sim 1,61$ eV değerinde gözlemlenen PL sinyal şiddeti düşüktür. Uygulanan voltajla beraber, kuyu içine akan taşıyıcı sayısı arttığından PL şiddetinde artış olmuştur. Uygulanan voltaj değeri yapıda tınlaşım tünellemenin olduğu seviyeye geldiğinde ise taşıyıcıların kuyu içindeki yaşam süreleri azaldığından (taşıyıcılar doğrudan tünelleyerek ikinci engel sonrasına geçerler) PL sinyal şiddetinde düşme gözlenmiştir (Şekil 4.3).



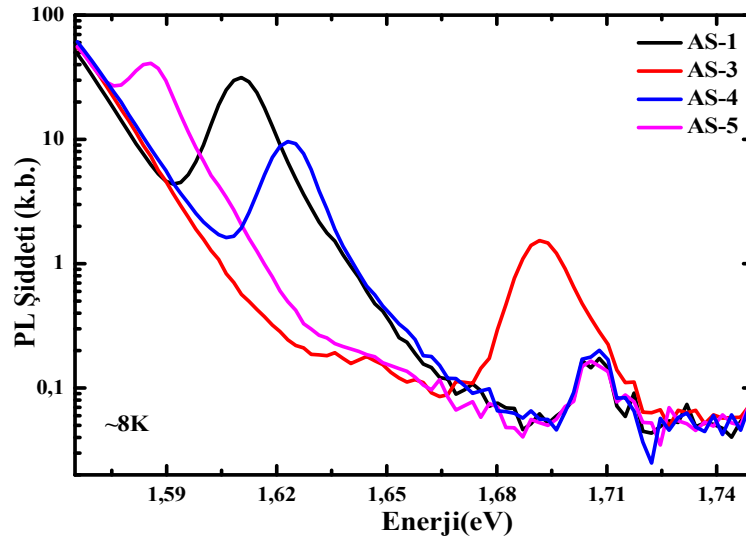
Şekil 4.3 AS-1 kodlu örneğin ~ 6 K'deki voltaj bağımlı fotoluminesans (E-PL) grafiği.

Tınlaşım tünelleme akımının varlığı gözlemlendikten sonra Tablo 3.2'de ayrıntıları verilen diğer numuneler büyütülmüş ve AS-1 numune ile aynı aygıt üretim işlemlerinden geçirilmiştir. İkinci grup olarak büyütülen bu yapıların düşük sıcaklık I-V ölçümlerinde kuantum kuyu enerji seviyesi üzerinden tünelleme olayı sadece AS-5 numaralı örnekte görülmüştür (Şekil 4.4). Bu örneğin daha büyük voltaj değerlerinde görünen akım düşmesi kuyu içindeki ikinci enerji seviyesi üzerinden gerçekleşen tınlaşım tünellemeden kaynaklanmaktadır. Diğer örneklerde tünelleme karakterinin görünmemesi ise beklenen sonuçlar ile uyumsuzluk göstermektedir. Bu durumun anlaşılabilmesi ve kuyu içindeki enerji seviyelerinin konumları hakkında bilgi alabilmek için düşük sıcaklık PL ölçümleri yapılmıştır.

Kuyu içindeki enerji seviyesinden gelen PL sinyalini netleştirmek için GaAs üst kontak bölgesinden gelen baskın sinyal şiddetini düşürmek gerektiğinden numunelerin üst kontak bölgesi aşındırılmıştır. Düşük sıcaklıkta ($\sim 8\text{K}$) yapılan PL ölçüm sonuçları Şekil 4.5’de gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Farklı kuyu ve engel genişliklerine sahip örneklerin I-V ölçüm grafiği.



Şekil 4.5 GaAs üst katmanı aşındırılmış numunelerin düşük sıcaklık ($\sim 8\text{K}$) PL ölçüm grafiği.

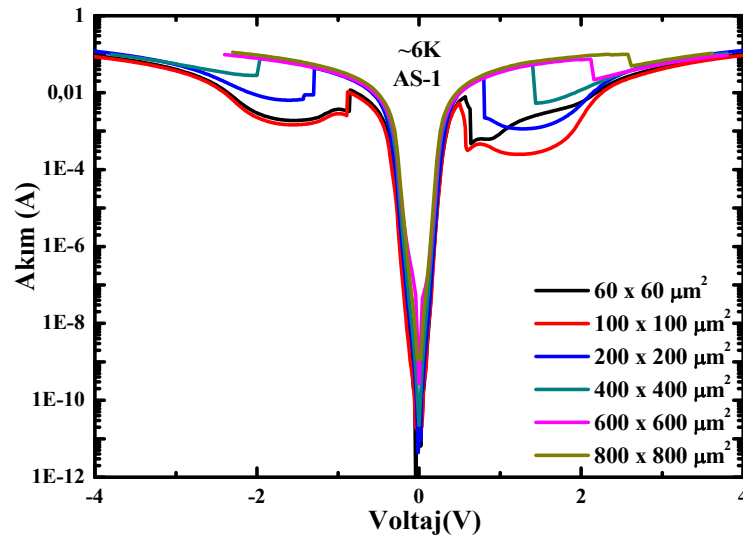
Tablo 4.1’de deneysel ve teorik olarak elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Bu tabloya göre, büyütülen numunelerin kuantum kuyu genişliklerinin hedeflenen değerlere kıyasla daha dar olduğu gözlenmektedir ve hatta kendi aralarında tutarlı oldukları da söylemek mümkündür. Böylece, yukarıya kayan enerji seviyelerinden tünellemenin gözlenebilmesi için daha büyük voltaj değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum, tünellemenin gerçekleşeceği akım-voltaj değerini sonuçları verilen aygıt boyutları için okunabilir bölgenin dışına çıkartmıştır.

Tablo 4.1 Deneysel ve teorik olarak elde edilen sonuçların karşılaştırılma tablosu.

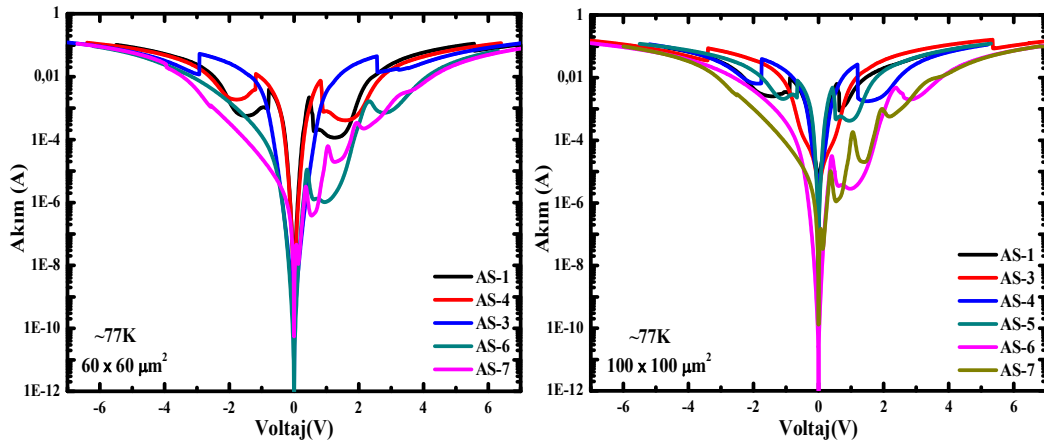
Numuneler	Teorik Sonuçlar		Deneysel Sonuçlar	
	Hedeflenen kuyu genişliği (Å)	Hesaplanan Kuyu içi seviyeler arası geçiş enerjisi (eV)	Ölçüm Sonuçları (eV)	Ölçüm sonuçlarından elde edilen kuyu genişliği (Å)
AS-1	60	1,592	1,610	52,0
AS-2	60	1,592	1,610	52,0
AS-3	40	1,648	1,690	31,5
AS-4	60	1,592	1,623	47,0
AS-5	80	1,563	1,585	63,5
AS-6	60	1,592	--	--
AS-7	150	1,528	1,535	125

Bu örneklerde, yapı içinden geçen akım miktarının azaltılması ve tınlaşım tünelleme akımının gözlenebilir hale getirilmesi için daha küçük boyutlara sahip mesa yapısı kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle, daha küçük boyutlara sahip yeni aygıt üretimi yapılmış ve akım-voltaj ölçümleri tekrarlanmıştır. Farklı aygıt büyüklüklerinin akım ve tınlaşım tünellemenin görüldüğü voltaj değerine etkisini göstermek amacıyla AS-1 kod numaralı örnek için yapılan ölçüm sonuçları örnek olması bakımından Şekil 4.6’de gösterilmiştir. Aygıt boyutu küçüldükçe tünelleme

akımının daha küçük değerlere kayması, aygıt boyutuna bağlı olarak değişen seri dirençten kaynaklanmaktadır. Benzer şekilde diğer örneklerde de yeni üretilen küçük aygıtlar üzerinden yapılan akım-voltaj ölçümlerinde, tınlaşım tünelleme olayı farklı büyüklüklerdeki mesa yapıların hepsinde, mesa yapının büyüklüğüyle orantılı olarak görülmüştür. İlk aygıt üretiminde tınlaşım tünellemenin görülmediği örneklerde, yeni fabrikasyon sonrasında daha küçük aygıtlar üzerinden elde edilen akım-voltaj ölçüm sonuçları Şekil 4.7’de verilmiştir. Örneklerden elde edilen karakterlerin değerlendirmesi aşağıda daha ayrıntılı olarak ayrıca yapılacaktır.

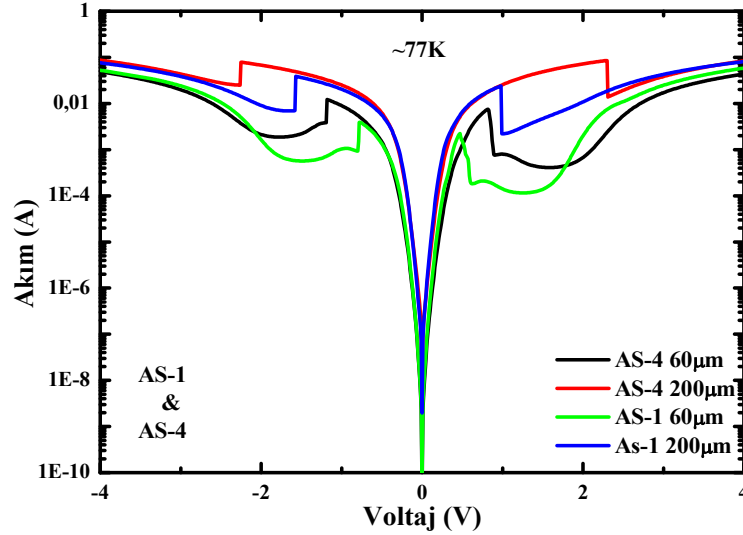


Şekil 4.6 AS-1 kodlu örneğin mesa büyüklüğüne göre I-V grafiği.



Şekil 4.7 Çift engel tınlaşım tünelleme yapılarında kenar uzunlukları 60μm ve 100μm büyüklüğünde kare mesa yapılarından alınan akım-voltaj grafikleri.

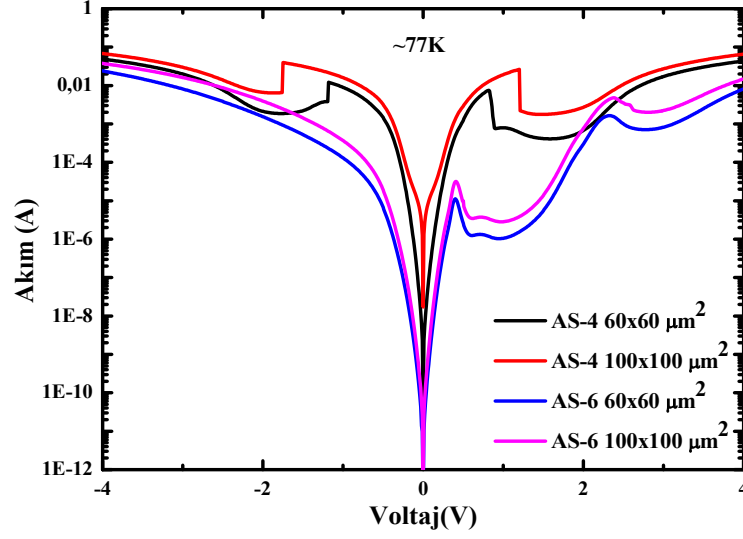
Yapılan ölçümlerde, AS-1 kod numaralı örnekle aynı yapıya sahip olması beklenen AS-4 numaralı örnekte tınlaşım tünellemenin görüldüğü voltaj değerleri, AS-1 numaralı örnekten görünenle kıyaslandığında farklılık göstermektedir. Bu durum, önceden de bahsettiğimiz gibi MBE sistemindeki büyütme oranında meydana gelen değişimden kaynaklanmaktadır. Büyüme oranının azalması kuantum kuyuların hedeflenen değerlerden daha dar olmasına ve dolayısıyla enerji seviyelerinin yukarıya (daha büyük enerjilere) kaymasından kaynaklanmaktadır. Adı geçen iki örneğin aynı büyüklüklerdeki mesa yapıları için düşük sıcaklık akım-voltaj grafikleri karşılaştırma amacıyla Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8 Düşük sıcaklıkta (~77K) iki farklı mesa büyüklüğü için AS-1 ve AS-4’ün karşılaştırılmalı I-V ölçüm sonucu.

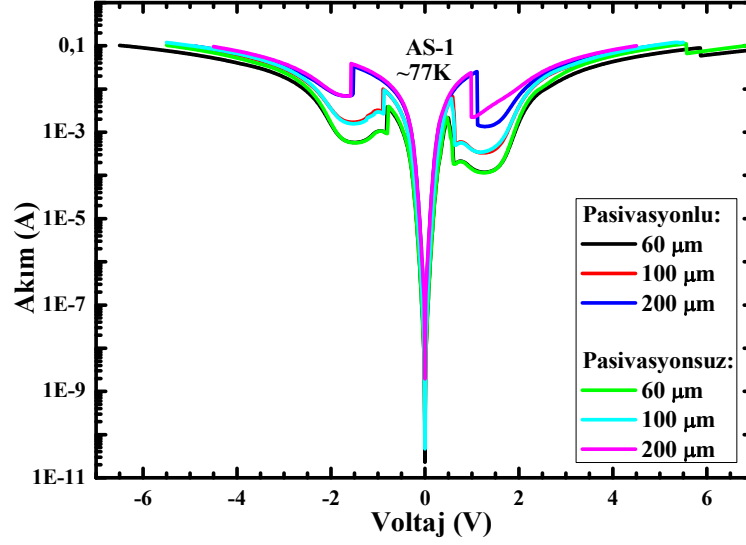
Engel genişliğinin etkisini gözleyebilmek için farklı AlGaAs engel genişliklerine sahip AS-4 ve AS-6 kodlu numunelerin düşük sıcaklık (~77K) I-V grafikleri Şekil 4.9’de gösterilmiştir. Bölüm 2’de bahsedildiği gibi, engel genişliği arttıkça tünelleme olasılığı azalacağından akım değeri beklendiği gibi azalmaktadır. Ayrıca, önceden bahsedildiği gibi engel genişliğinin artmasıyla kuantum kuyu enerji seviyeleri üzerinden tınlaşım tünelleme akımının gözlemlendiği voltaj değerleri daha düşük değerlere kayar. Böylece, AS-6 numaralı örnekte görüldüğü gibi (Şekil

4.9), üst enerji seviyelerinden gerçekleşen tünelleme durumları da gözlemlenmektedir.



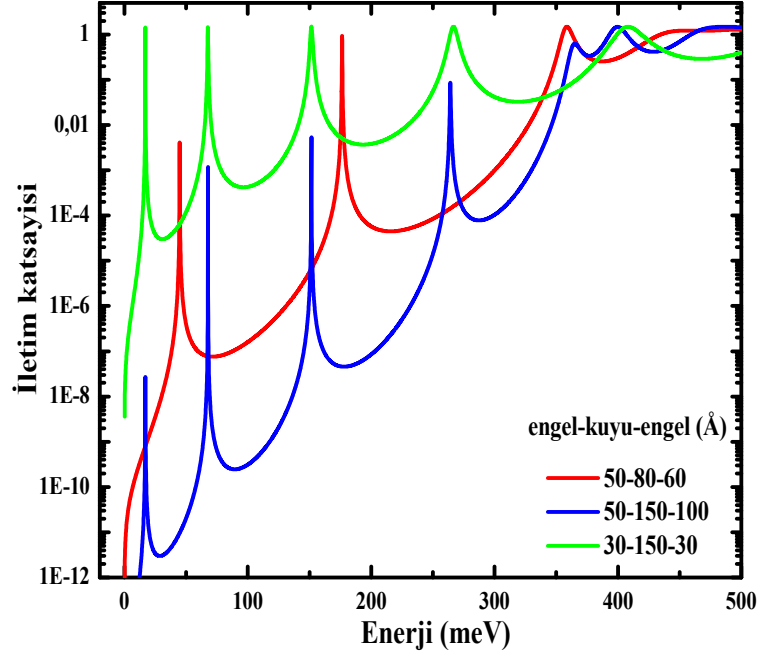
Şekil 4.9 AS-4 ve AS-6 kodlu örneklerin düşük sıcaklık (~77K) I-V ölçüm grafiği.

Ek olarak, örneklerdeki yüzey kaçak akımlarını engellemek için numunelere pasivasyon yapılmış ve etkisi incelenmiştir. Pasivasyon işleminde, örneklerin metal kaplanmayan ve açıkta kalan kısımları (üst ve alt kontak arasında kalan mesa yan yüzeyleri) fotorezist ile kaplanarak kapatılmıştır ve böylece yüzey kaçak akımlarının azaltılması beklenmiştir. AS-1 kodlu örnek için, pasivasyon yapılmış ve yapılmamış farklı büyüklüklerdeki aygıtların düşük sıcaklık (~77K) I-V ölçüm sonuçları karşılaştırmalı olarak Şekil 4.10'de verilmiştir. Ölçümler sonucunda, çalışılan örneklerde pasivasyonun herhangi bir iyileşmeye sebep olmadığı görülmüştür.



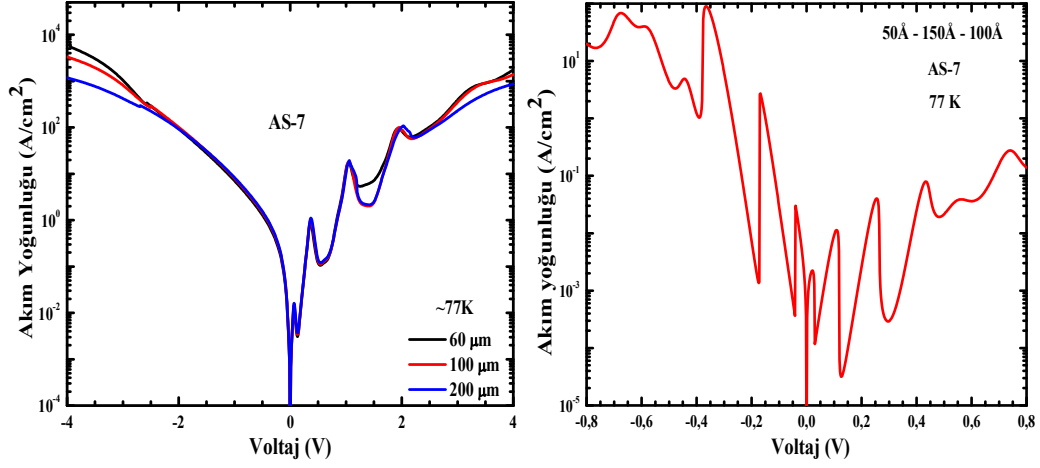
Şekil 4.10 AS-1 kodlu örnek için, pasivasyon işlemi uygulanmış ve uygulanmamış farklı büyüklüklerdeki aygıtların I-V ölçüm sonuçları (~77 K).

Geçirgenlik katsayısı, çift engel tınlaşım tünelleme yapısını açıklamada önemli bir rol oynamasına rağmen, ölçülebilir bir nicelik olmadığından bahsedilmiştir. Bu nedenle, iletim katsayısını elde etmek için, taşıma matrisi yöntemi ile tüm yapı için düzlem dalga kullanılarak Schrödinger denkleminin çözüldüğü kuramsal hesaplamalar yapılmıştır. Farklı engel ve kuyu genişliklerine sahip çift engel tınlaşım tünelleme yapılar için yapılan hesaplamalar Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Kuyu genişliğinin artması, çok sayıda enerji seviyesinin oluşmasına sebep olmuş ve uygulanan gerilimle bu enerji seviyeleri üzerinden tünelleme akımları görülmüştür. Yapıdaki toplam engel genişliği arttıkça, iletim katsayısının azaldığı ve kuyu genişliğinin azalmasıyla da enerji seviyelerinin daha büyük değerlere kaydığı yine Şekil 4.11’de verilen iletim katsayısı-enerji grafiğinden görülmektedir. Düşük sıcaklık akım-voltaj grafikleri Şekil 4.7 ve Şekil 4.9’da verilen örneklerden elde edilen sonuçlar, yapılan modelleme sonuçlarıyla uyum halindedir.



Şekil 4.11 Farklı engel ve kuyu genişliklerine sahip çift engel tınlaşım tünelleme yapılarında iletim katsayısı-enerji grafiği.

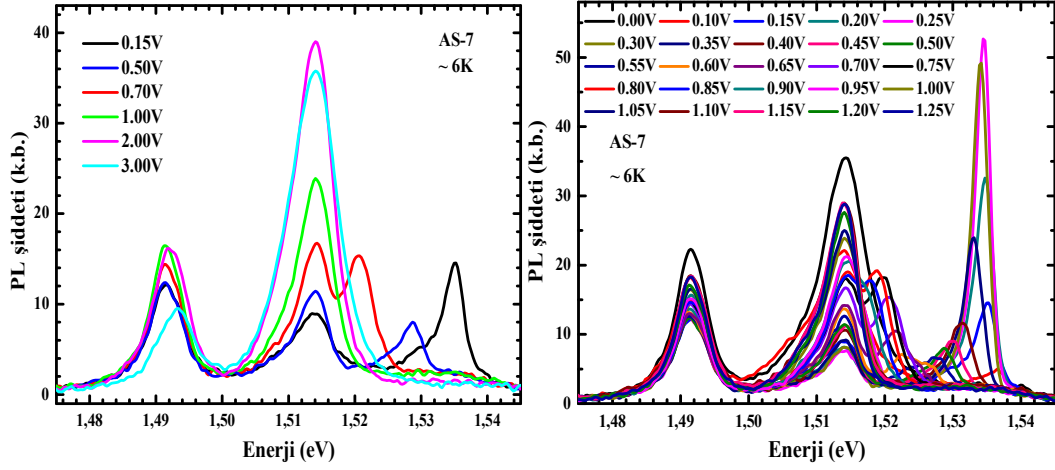
Kuantum kuyu genişliğinin artmasıyla çok sayıda enerji seviyesi üzerinden gerçekleşen tınlaşım tünelleme olayının gözlemlendiği AS-7 örneği, hesaplamalar için referans olarak alınmıştır. Bu örneğin, sadece kuyu ve engelleri düşünerek yapılan hesaplama ve ölçüm sonucunda elde edilen akım yoğunluğu-voltaj grafiği Şekil 4.12'de verilmiştir. Deneysel voltaj değerlerinin hesaplanan değerlerle aynı olmamasının sebebi, AS-7 numaralı örnekte var olan katkısız ayırıcı bölgelerin ve diğer voltaj düşüren tabakaların hesaplamalara katılmamış olmasından kaynaklanmaktadır. Negatif voltaj kısmında, deneysel olarak tınlaşım tünelleme karakterlerinin görünmemesinin temel nedeni, elektronların öncelikle ince engeli geçiyor olmalarından dolayı yapı içinden akan toplam akımın yüksek olmasıdır. Bu durum, hesaplanan değerlere bakıldığında, negatif voltaj kısmında elde edilen akım yoğunluğunun, pozitif voltaj kısmına kıyasla birkaç merteye daha fazla olduğunun gözlenmesiyle de desteklenmektedir.



Şekil 4.12 Geniş kuyuya sahip AS-7 numaralı tınlaşım tünelleme örneğinden farklı büyüklüklerdeki (60 μm , 100 μm ve 200 μm) kare mesa yapıların (sol) ölçülen ve (sağ) hesaplanan akım yoğunluğu-voltaj grafikleri.

Kuantum kuyu içindeki sınırlandırılmış enerji seviyeleri ve yapı hakkında daha fazla bilgi edinebilmek için en geniş kuyuya sahip olan AS-7 kod numaralı örnek üzerinde ayrıntılı olarak opto-elektronik ölçümler yapılmıştır. Bu örnek üzerine uygulanan voltaj değiştirilerek fotoluminesans (E-PL) sinyalinin değişimine bakılmış ve sonuçlar Şekil 4.13’de gösterilmiştir. Örnek üzerinde voltaj uygulanmadığı zaman yaklaşık 1,540 eV’da zayıf olarak görünen sinyal, kuantum kuyu taban enerjisinden gelen sinyaldir. Bu değer, 10 K sıcaklık için hesaplanan 1,53976 eV’luk enerji değeriyle uyum içindedir. 1,514 eV ve 1,482 eV’de görünen sinyaller ise GaAs bant kenarı ve bant içindeki enerji geçişlerinden kaynaklanmaktadır. Uygulanan voltajla beraber, kuantum taban enerjisinden kaynaklanan sinyalde gözlenenler şöyle sıralanabilir;

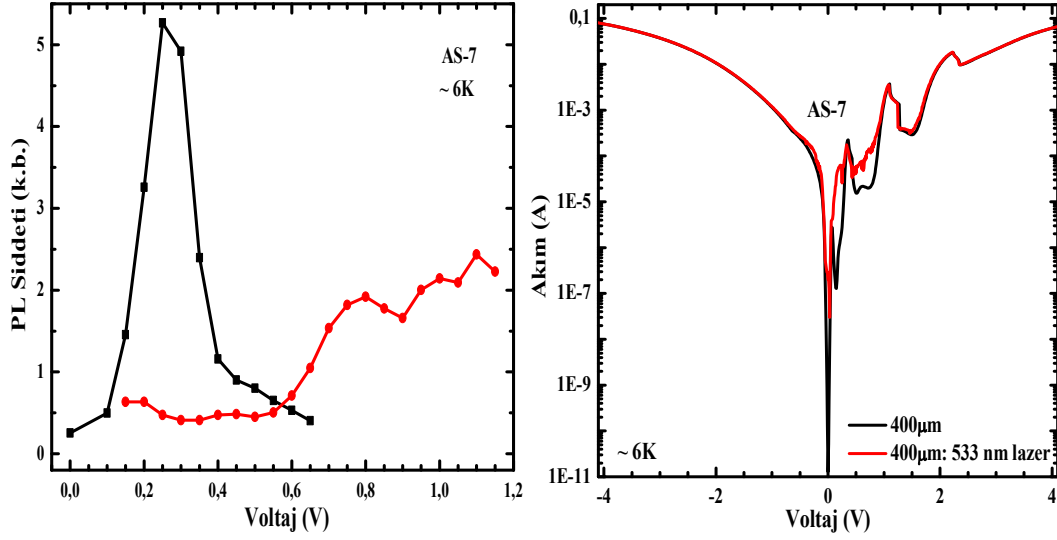
1. şiddetinde artma ve azalma
2. küçük enerjiye doğru kayma
3. sinyalde çatallanma ve uygulanan büyük voltaj değerlerinde küçük enerji kısmının baskın hale gelmesi.



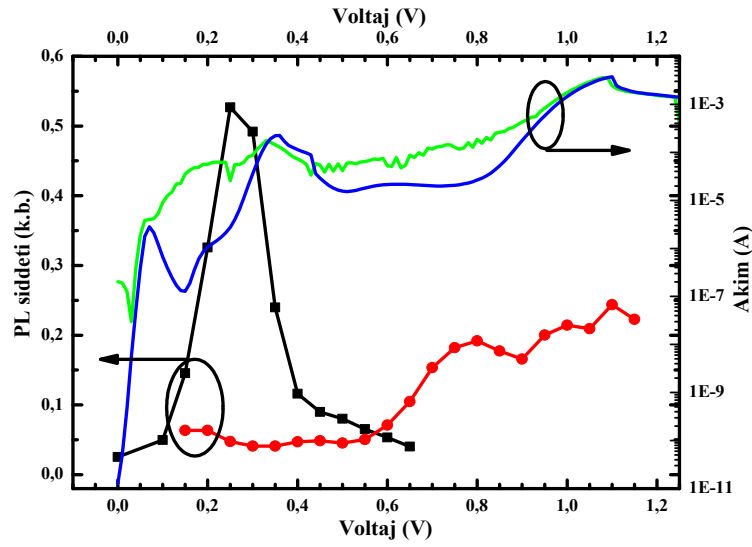
Şekil 4.13 Düşük sıcaklık voltaj bağımlı fotolüminesans (E-PL) ölçümleri. AS-7 kodlu örnekten (sol) büyük voltaj aralığında alınan PL sinyalinin değişimi ve (sağ) GaAs külçe ve kuantum kuyu enerji seviyesinden alınan sinyalin daha küçük voltaj bölgesindeki değişiminin ayrıntılı gösterimi.

Şekil 4.14'nin sol panelinde, uygulanan voltaja bağlı olarak PL sinyallerinin şiddetindeki değişim gösterilmiştir. Görüldüğü gibi kuantum taban enerjisinden kaynaklanan sinyalin şiddeti hızlıca artmış ve sonrasında azalmıştır (siyah noktalardan oluşan eğri). Bunun sebebi şöyle açıklanabilir: uygulanan voltajın etkisiyle kuantum kuyu içine daha geniş olan engel yönünden elektronlar pompalanmakta ve böylece kuyu içindeki taşıyıcı sayısı artmaktadır. Uyarma lazerinin etkisiyle hali hazırda sürekli olarak yaratılan elektronlar ve değerlik bandında var olan boşluklar yeniden birleşerek daha fazla PL sinyali yaratmıştır. Uygulanan voltaj değeri 0,25 V'a ulaştığında tınlaşım durumu gerçekleşmiş ve biraz daha arttırılmasıyla da bu hizalanma durumu bozulmuştur. Tınlaşım durumunun bozulmasıyla kuyu içindeki taşıyıcı sayısı azalmış ve böylece PL sinyalinin şiddetinde düşüş gözlemlenmiştir. Şekil 4.14'nin sağ panelinde ise, elektro-fotolüminesans ölçümleri sırasında üzerinde ölçüm yapılan aygıttan alınan akım-voltaj grafiği gösterilmiştir. Kırmızı eğri, fotolüminesans ölçümü yapılırken kullanılan lazer ışığının örnek üzerine düştüğü zaman elde edilmiştir; böylece lazer ışığından kaynaklanan foto-akımın etkisi görülebilmektedir. E-PL ölçümlerinde kullanılan lazer şiddeti, grafikten de görüldüğü gibi kuyu enerjileri üzerinden tünelleme olaylarının görülmesini engellemeyecek mertebede seçilmiştir. PL

şiddetindeki değişimin, yapı içindeki tünelleme ile ilişkisinin daha net görülebilmesi için Şekil 4.14’de gösterilenler, Şekil 4.15’de aynı grafik üzerinde karşılaştırmalı olarak yeniden gösterilmiştir.

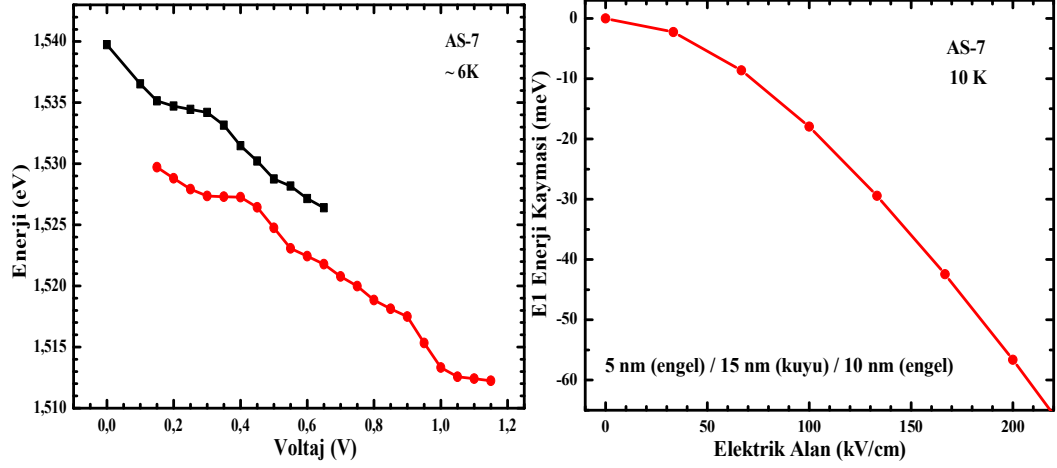


Şekil 4.14 (sol) Düşük sıcaklık E-PL ölçümlerinden (Şekil 4.15) elde edilen PL şiddeti değişimi ve (sağ) ölçüm alınan aygıtın farklı koşullardaki akım-voltaj grafiği.



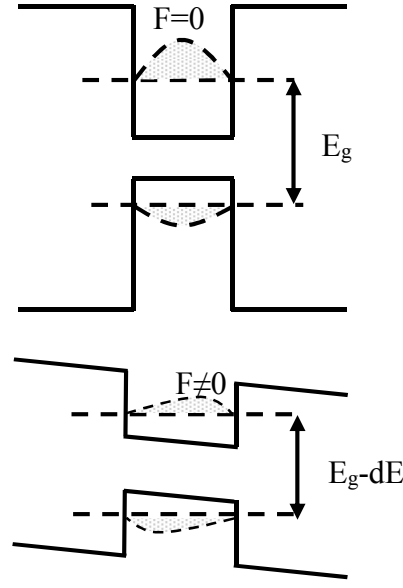
Şekil 4.15 AS-7 numaralı örnek için PL şiddetindeki değişim ile tünelleme akımının karşılaştırılması.

Şekil 4.13’de görülen ve yukarıda bahsedilen voltaja bağlı olarak PL sinyalindeki küçük enerjiye kayma ise grafiksel olarak Şekil 4.16’in sol panelinde gösterilmiştir. Bu kaymanın sebebinin, kuantum sınırlı Stark etkisi (quantum-confined Stark effect – QCSE) olduğu düşünülmektedir. QCSE, büyütme yönünde uygulanan elektrik alan altında kuantum kuyu içerisindeki sınırlı elektron ve boşluk durumlarının verdiği tepki olarak tanımlanabilir [33]. Uygulanan elektrik alanın etkisi, bir kuantum kuyunun ışık emilme ve yayılma spektrumunu etkilemektedir. Elektrik alanın olmadığı durumda, kuantum kuyu içindeki elektronlar ve boşluklar, sadece ayrık kuantum kuyu alt bant enerjilerini doldurabilirler. Dışarıdan elektrik alan uygulandığında, elektron durumları küçük enerjilere doğru kayarken, boşluk durumları ise büyük enerjilere doğru kayar (Şekil 4.17). Dışarıdan uygulanan elektrik alanın etkisiyle kuantum kuyu enerji seviyesinde meydana gelen kaymayı gösterebilmek için AS-7 kodlu örnek parametrelerini kullanarak kuyu enerjileri farklı elektrik alanlar için hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.16’in sağ panelinde gösterilmiştir. AS-7 yapısında, uygulanan elektrik alanın sadece katkısız bölgelere (engeller ve kuyu dışında kalan katkısız ayırıcı GaAs tabaka dâhil) düştüğü düşünüldüğünde, toplam kalınlık 70 nm (=20+5+15+10+20 nm) olur ve buna karşılık gelen elektrik alan ise yaklaşık olarak 140 kV/cm olarak bulunur. Özellikle yapı içindeki gerçek elektrik alan değerinin bundan daha küçük olduğu düşünüldüğünde (uygulanan potansiyel fark, daha az katkılı bölgelere de düşmektedir), Şekil 4.16’de görülen enerjideki kayma değerleri (hesaplanan ve deneysel olarak bulunan) karşılaştırılabilir mertebelindedir.



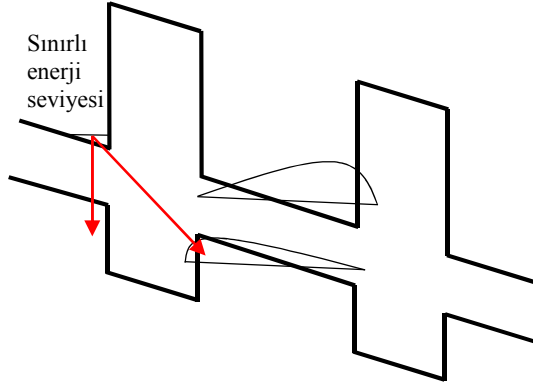
Şekil 4.16 (sol) PL sinyal şiddetinin uygulanan voltajın fonksiyonu olarak değişimi. (sağ) Kuantum kuyu taban enerji seviyesinin (E1) elektrik alana bağlı olarak hesaplanan değişimi.

AS-7 kodlu örneğin asimetrik bir yapıya sahip olması ve kuyu genişliğinin diğer örneklere göre fazla olması dışarıdan uygulanan elektrik alanın enerji seviyeleri üzerindeki etkisini yani QCSE'ni baskın hale getirmiştir. AS-1 kodlu örneğinin Şekil 4.3'de gösterilen E-PL sonuçları incelendiğinde PL sinyalinin uygulanan voltajla kaymıyor olması da bu durumu desteklemektedir. Öte yandan, geniş kuyularda elektron ve boşluk dalga fonksiyonlarının örtüşmesi (overlap), elektrik alanın etkisiyle azalacağı için elektron-boşluk yeniden birleşme olasılığı da azalacaktır. Bu durum Şekil 4.17'de gösterilmiştir. Bu gösterimde, F elektrik alanı, E_g iletkenlik bandındaki taban enerji seviyesi ile değerlik bandındaki taban enerji seviyesi arasındaki yasak bölgeyi ve dE ise elektrik alan altında taban enerji seviyelerin kayma miktarını temsil etmektedir.



Şekil 4.17 Kuantum sınırlı Stark etkisinin (quantum-confined Stark effect – QCSE) şematik gösterimi.

Şekil 4.13’de görünen ve yukarıda bahsedilen PL sinyalindeki çatalanma sonucunda oluşan tepenin (Şekil 4.14’nin sol panelinde şiddetinin, Şekil 4.16’in sol panelinde ise enerjisinin voltaja bağlı değişimi verilen kırmızı eğri) sebebinin Şekil 4.18’de şematik olarak gösterilen mekanizma olduğu düşünülmektedir. Uygulanan voltajın etkisiyle, engel dışında oluşan üçgen potansiyel nedeniyle sınırlı enerji seviyeleri oluşmaktadır. Burada biriken elektronların doğrudan GaAs bant kenarındaki veya kuyu içindeki boşluklar ile yeniden birleşerek bahsi geçen sinyali oluşturabilir.

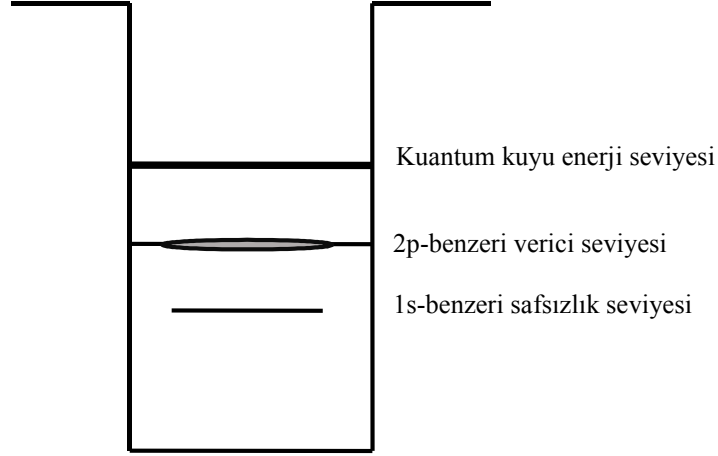


Şekil 4.18 Engel dışında sınırlı enerji seviyelerinin oluşmasını ve PL sinyali yaratan olası geçişleri gösteren bant yapısının şematik gösterimi.

5. KUYU İÇİNDEKİ SAFSIZLIK ATOMLARI ÜZERİNDEN TINLAŞIM TÜNELLEMEİNİN GÖZLENMESİ

Elektromanyetik spektrumun en az gelişmiş bölgesi olan terahertz (THz) frekans bölgesi, güvenlik, tıbbi görüntüleme, haberleşme, kalite kontrol gibi uygulama alanlarında kullanılabilir olmasından dolayı son yıllarda bilim dünyasının ilgi odağı olmuştur. Bu bölgenin sahip olduğu yeteneklerin kullanılabilmesi için, THz bölgede çalışan ışık yayıcılarına ve algılayıcılarına ihtiyaç duyulmaktadır. Yarıiletken büyütme teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, katman yapılarının, katkı türü ve miktarlarının farklı şekillerde tasarlanarak istenen bölge için ayarlanabilen kuantum kuyu ve kuantum nokta yapıları bu bölgedeki çalışmalar için önem arz etmektedir. Kuantum kuyuların içindeki enerji seviyelerini etkileyen etkenlerin iyi bilinmesi, gelişen teknoloji ile istenilen şekilde büyütülebilmelerine rağmen bu yapıların sahip olduğu taşınım fiziği özelliklerinden ötürü THz bölgede çalışmaları zordur. Buna alternatif olarak düşünülen üç boyutta sınırlamanın olduğu kuantum nokta yapılarına baktığımızda ise bu yapıların enerji seviyelerini tanımlanmasını sağlayan kuantum noktaların büyüklüklerini kontrol etmek şu an için yeterli olgunluğa erişmediğinden bu bölgedeki çalışmalar isteneni karşılayamamıştır [34].

Kuantum kuyu yapılarının büyütülmesindeki tecrübe ve rahatlık, kuantum noktaların atom benzeri enerji seviyelerinin sağladığı avantajlar birleştirilerek [28] kuantum kuyu içinde sınırlanmış safsızlık atomlarının bağlanma enerjilerinin THz uygulamalarda kullanılabileceği ön görülmüştür [34, 35, 36]. Kuantum kuyu içerisinde sınırlandırılmış safsızlık atomlarının varlığı, kuyu içi enerji seviyeleri altında ve kuyu taban enerjisine bağlı sınırlandırılmış yeni enerji seviyelerin oluşmasına sebep olmaktadır [35]. Bu durum şematik olarak Şekil 5.1'de gösterilmiştir.

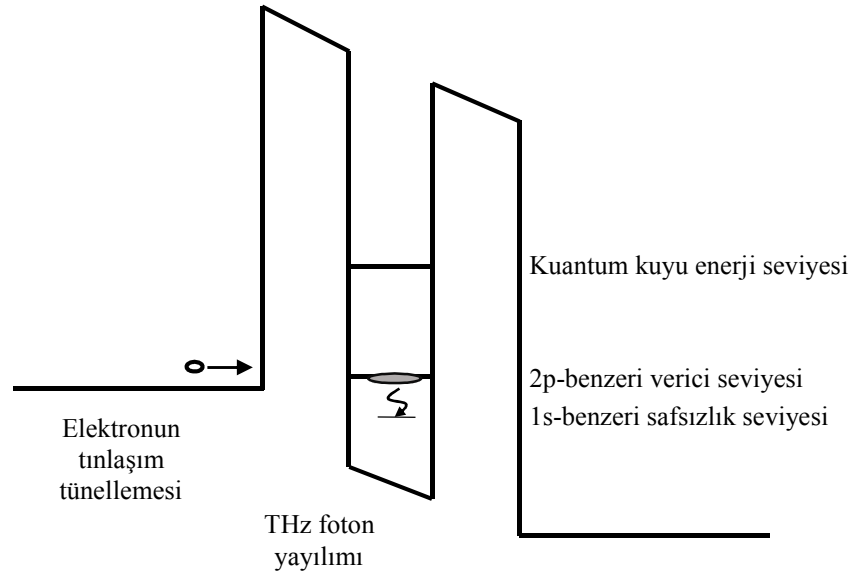


Şekil 5.1. Kuantum kuyu içindeki safsızlık atomlarının sınırlandırılmış enerji seviyelerinin şematik gösterimi.

Kuantum kuyu içerisine az miktarda katkılanmış safsızlık atomlarının verici (2p) ve safsızlık (1s) seviyelerinin bağlanma enerjileri, kuantum kuyunun genişliğine, sınırlama potansiyeline, kuyu içindeki safsızlık atomlarının konumuna ve safsızlık atomunun türüne göre değişmektedir [35, 8, 28]. Öyle ki, kuantum sınırlamanın artması, kuantum kuyu enerji seviyelerinin kuyu dışına doğru itilmesine ve bağlanma enerjisinin azalmasına sebep olur. Safsızlık atomlarının kuyu içinde bağlanma enerjilerinin en büyük oldukları konum ise kuyunun orta noktasıdır ve kuyu kenarlarına doğru gidildikçe bu enerji azalmaktadır [37]. Diğer kritik nokta ise, safsızlık atomlarının bağlanma enerjilerinin Hidrojen atomu benzeri özellik gösterebilmesi için birbirleri arasındaki uzaklığın Bohr yarıçapından büyük olması gerekliliğidir.

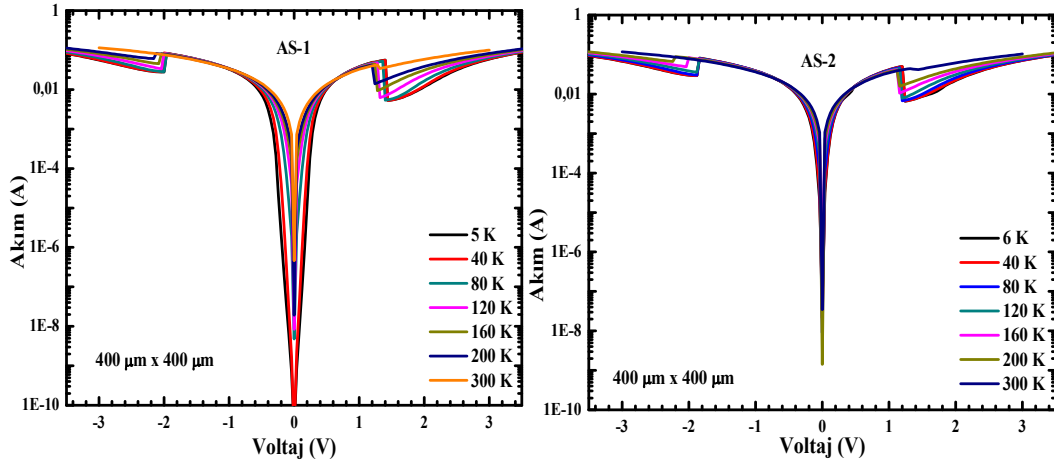
Kuantum kuyu içindeki safsızlık atomlarındaki dipol izinli 1s – 2p geçişleri aygıt uygulamalarında kullanılabilir potansiyele sahiptir. Çift engelli bir kuantum kuyu tınlaşım tünelleme diyot yapısı THz bölgede ışımaya yapan lazer için ön aşama olarak gösterilebilir (Şekil 5.2). Verici destekli tünelleme işleminde, dışarıdan uygulanan voltajın etkisiyle kuantum kuyu içindeki 2p-benzeri verici 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 5.2’de gösterildiği gibi altbantlar arası

geçiş yaparak ($2p \rightarrow 1s$) foton yayarlar. Böylece, $1s$ -benzeri temel durum ve $2p$ -benzeri uyarılmış durum enerjileri kuyu genişliği, safsızlık atomlarının kuyu içindeki konumları, safsızlık cinsi düşünülerek THz bölgede geniş bir tayfi kapsayacak şekilde ışık yayıcılar yapılabilir. Bu hedef doğrultusunda öncelikle çift engel tınlaşım tünelleme diyot yapısı içindeki safsızlık atomlarının bağlanma enerjileri üzerinden tünelleme akımının gözlenmesi gerekmektedir.



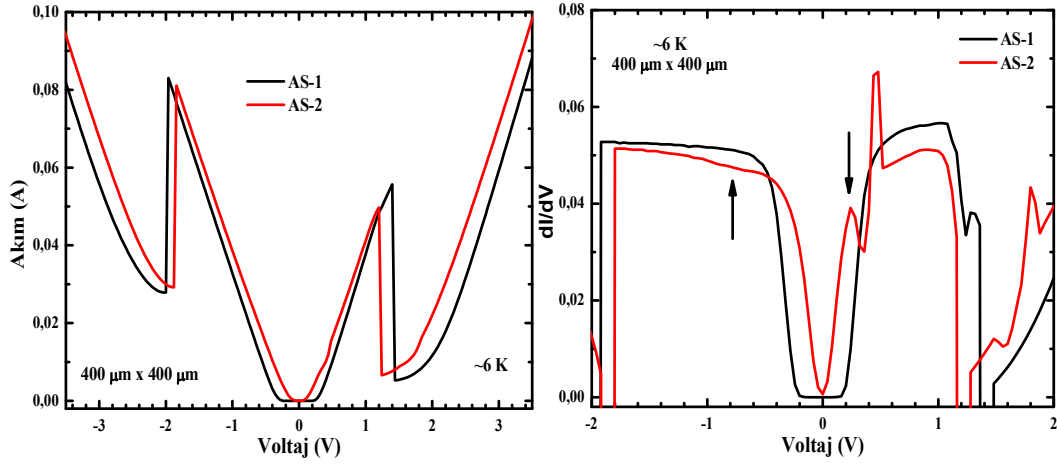
Şekil 5.2. Çift engel tınlaşım tünelleme diyot içindeki safsızlık durumları kullanılarak THz ışınım üretiminin şematik gösterimi.

Bu amaçla, ayrıntıları Tablo 3.2’de verilen delta katkılamanın yapıldığı AS-2 numunesi ile kontrol amaçlı katkılama yapılmayan AS-1 numunesi büyütülmüştür. Safsızlık atomlarının üzerinden tınlaşım tünelleme akımının varlığını anlamak için numuneler aygıt haline getirilmiştir. Şekil 5.3’de bahsi geçen örneklerin sıcaklık bağımlı akım-voltaj grafikleri gösterilmiştir: yaklaşık olarak +1,2 V ve -2 V’da gözlenen düşüşler, kuantum kuyu taban enerjisi üzerinden gerçekleşen tünellemeye karşılık gelmektedir. Katkılı AS-2 kod numaralı örnek üzerinden akan akımın, AS-1 örneğine kıyasla daha fazla olması yapı içindeki katkılamanın etkisini göstermektedir.



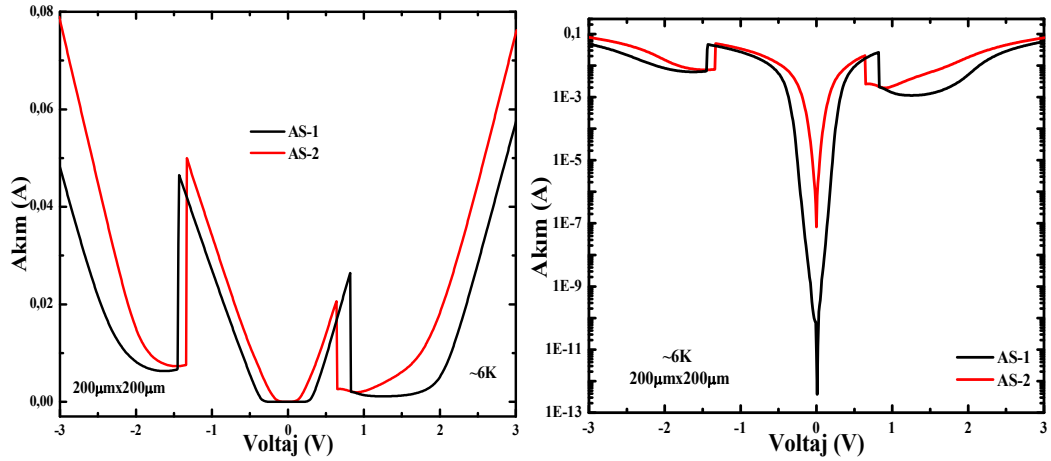
Şekil 5.3. (sol) AS-1 ve (sağ) AS-2 kod numaralı örneklerin sıcaklık bağımlı I-V ölçüm sonuçları.

AS-1 ve AS-2 kod numaralı örneklerin lineer ölçekte verilen düşük sıcaklık (~ 6 K) karşılaştırmalı akım-voltaj eğrilerine baktığımızda, kuyu içinin katkılanmadığı referans örneğinin (AS-1) akım değeri, kuyu içinin katkılandığı örneğin (AS-2) akım değerine kıyasla daha düşük olduğu açıkça görülmüştür (Şekil 5.4 sol). Aynı zamanda kuyu içindeki katkı atomlarının bağlanma enerjilerinin varlığı nedeniyle tünelleme akımının görüldüğü voltaj değerini daha küçük bölgeye kaydırmıştır. Bu gözlemler, AS-2 örneğinde katkı atomlarının varlıklarının net göstergeleridir. Delta katkılı safsızlık atomlarının varlıklarının daha net olarak görülebilmesi için örneklerin (AS-1 ve AS-2) lineer ölçekte karşılaştırmalı düşük sıcaklık (~ 6 K) akım-voltaj eğrileri ve akım-voltaj eğrilerin türevleri Şekil 5.4’de gösterilmiştir. Sadece δ -katkılı yapıda görünen ve şekilde ok ile gösterilen karakterlerin, safsızlık atomlarının bağlanma enerjileri üzerinden akan tünelleme akımından kaynaklandığı düşünülmektedir. Akım-voltaj eğrilerinden kuyu içinde katkı atomlarının var olduğu anlaşılmış ancak kuyu içindeki konumları hakkında kesin bir sonuca varılamamıştır.



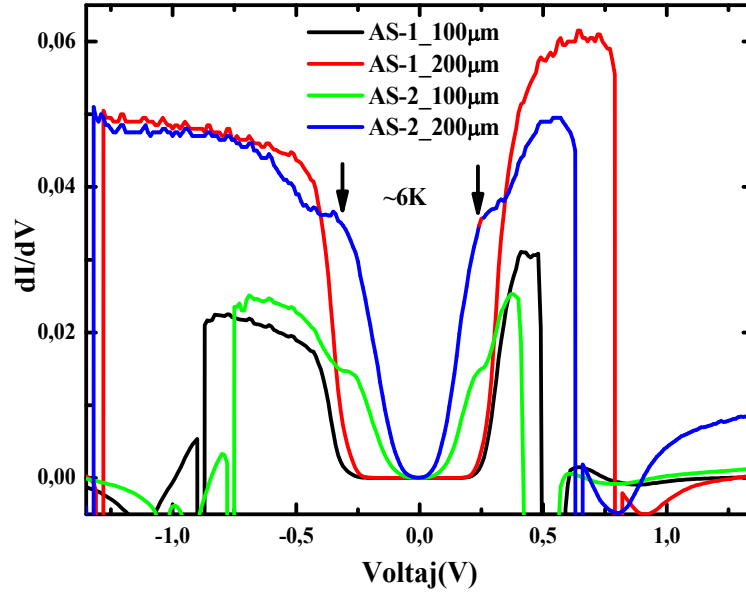
Şekil 5.4. AS-1 ve AS-2 kod numaralı örneklerin ~6K'de karşılaştırmalı I-V ölçüm sonuçları: (sol) lineer, (sağ) türev (dI/dV).

Elde edilen bu bilgiler ışığında, yapı içinden geçen akım miktarının azaltılması ve tınlaşım tünellemenin daha rahat görülebilmesi için daha küçük boyutlu mesa yapılarına sahip yeni aygıtlar üretilmiştir. Bu örneklerin ~6K karşılaştırmalı akım-voltaj eğrileri lineer (sol) ve logaritmik (sağ) ölçekte Şekil 5.5'de gösterilmiştir.



Şekil 5.5. AS-1 ve AS-2 kod numaralı örneklerin ~6K sıcaklığındaki 200μm büyüklüğünde kare mesa yapılarından alınan I-V ölçüm sonuçları: (sol) lineer, (sağ) logaritmik eksen.

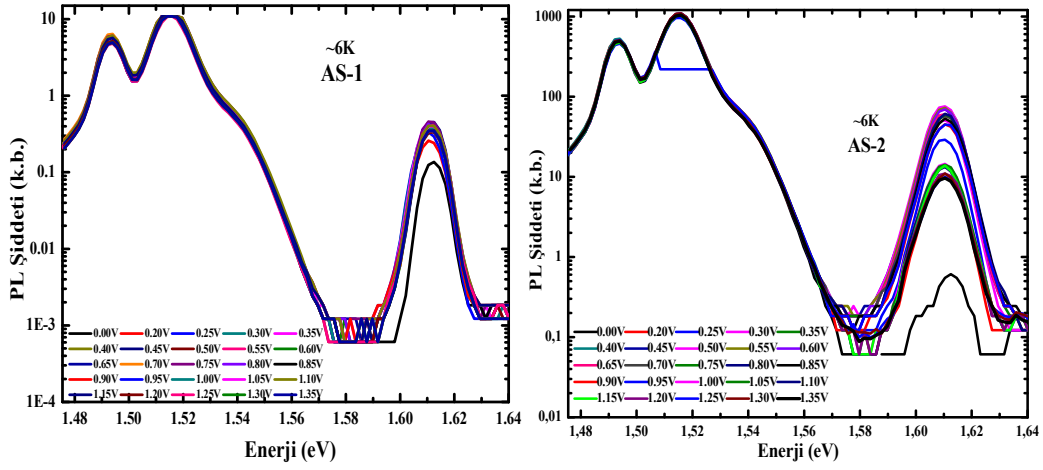
Küçük boyutlu mesaların karşılaştırıldığı akım-voltaj eğrilerinin türevi grafiğine (Şekil 5.6) baktığımızda, kuantum kuyu taban enerjisi üzerinden tınlaşım tünelleme olayının gözlemlendiği voltaj değeri öncesinde katkılama yapılan numunede ok ile gösterilen karakterler görülmüştür. Sadece delta katkı yapılarında görünen bu karakterler, safsızlık atomlarının bağlanma enerjileri üzerinden akan tünelleme akımından kaynaklanmaktadır.



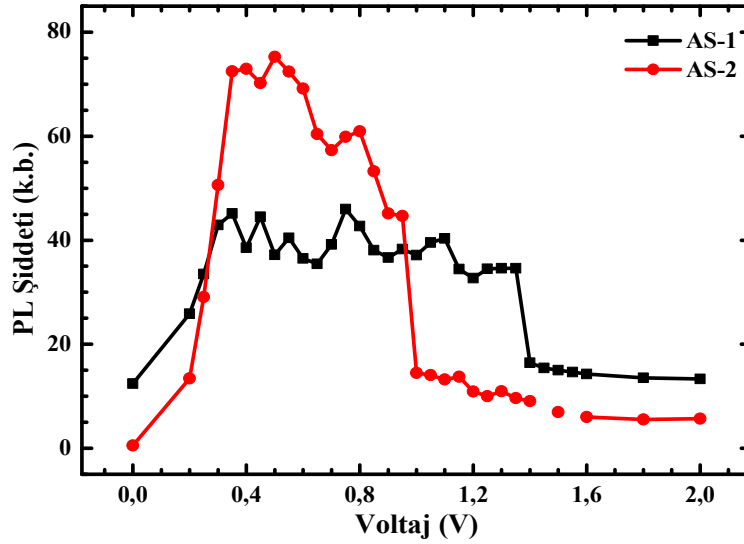
Şekil 5.6. AS-1 ve AS-2 kod numaralı örneklerin ~6K sıcaklıktaki karşılaştırmalı akım-voltaj eğrilerinin türevi (dI/dV).

Elektriksel ölçümlere ek olarak düşük sıcaklıkta voltaj bağımlı fotoluminesans (E-PL) ölçümleri yapılmış ve sonuçlar Şekil 5.7'de gösterilmiştir. Safsızlık atomlarının bağlanma enerjilerine karşılık gelen ayrık bir sinyal görülemedi ancak ~1,61 eV'da görünen kuantum kuyu taban enerji durumuna karşılık gelen PL sinyal şiddetinin voltaja bağlı değişimi iki örnek için karşılaştırılarak dolaylı bir sonuca ulaşılmaya çalışılmıştır. Şekil 5.9'da gösterilen PL sinyal şiddetinin voltaj bağımlılığı şu şekilde açıklanabilir: uygulanan voltajla birlikte kuyu içine akan taşıyıcı sayısı arttığından PL şiddeti artmakta ve uygulanan voltaj değeri yapıda tınlaşım tünellemenin olduğu seviyeye geldiğinde ise taşıyıcıların kuyu içindeki yaşam süreleri azaldığından (taşıyıcılar doğrudan tünelleyerek ikinci engel sonrasına geçerler) PL sinyal şiddetinde düşme

olmaktadır. Sonuçlardan, AS-2 kod numaralı örneğin PL sinyal şiddetinin AS-1 örneğine göre daha fazla olduğu ve PL sinyalindeki düşüşün ise daha küçük voltaj değerine denk geldiği gözlenmiştir. Bu durum, elektriksel ölçümlerde olduğu gibi AS-2 kodlu örneğin kuantum kuyu içerisinde safsızlık atomlarının var olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.7. AS-1 (sol) ve AS-2 (sağ) kodlu örneğin ~6 K sıcaklığındaki voltaj bağımlı fotoluminesans (E-PL) grafiği.



Şekil 5.8. AS-1 ve AS-2 kodlu örneklerin 1,61 eV (770 nm) enerji değerine karşılık gelen PL sinyalinin şiddetinin voltaja bağlı değişimi.

6. SONUÇ

Bu tez kapsamında, GaAs/Al_xGa_{1-x}As malzeme sistemi kullanılarak sistematik olarak çift engel tınlaşım tünelleme diyot yapıları moleküler demet epitaksi (MBE) yöntemiyle büyütülmüş ve yapı içindeki akım mekanizmalarının bağlı olduğu parametreler optoelektronik karakterizasyon teknikleri yardımıyla tanımlanmıştır. Ek olarak, THz uygulamalarına temel oluşturmak amacıyla kuantum kuyu içine katkılanmış safsızlık atomları üzerinden tınlaşım tünelleme akım mekanizması gözlenmiştir.

Çift engel tınlaşım tünelleme diyot yapıları, %40 hedef Al alaşımı içeren AlGaAs engel yüksekliğine sahip olacak şekilde kuyu ve engel genişlikleri değiştirilerek sistematik olarak büyütülmüştür. Büyütülen yapılar aygıt üretim işlemlerinden geçirilerek opto-elektronik ölçümlere hazır farklı diyot büyüklüklerinde aygıtlar haline getirilmişlerdir. Aygıt haline gelen numunelerden sıcaklık bağımlı akım-voltaj (I-V) ölçüm sonuçlarında kuantum kuyu içindeki enerji seviyesi üzerinden tınlaşım tünelleme akımı gözlemlenmiştir. Ayrıca, kuantum kuyu genişliğinin artmasıyla kuyu içinde oluşan üst enerji seviyeleri üzerinden gerçekleşen tınlaşım tünelleme olayının gözlemlendiği AS-7 numunesi, hesaplamalar için referans olarak alınmıştır. Bu numunenin, sadece kuyu ve engelleri düşünerek yapılan hesaplama ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması yapılmıştır.

Farklı engel genişliklerine sahip numunelerin akım – voltaj karakteristikleri incelendiğinde, engel genişliğinin artmasıyla tünelleme olasılığının dolayısıyla yapı içinden akan akımın azaldığı gözlenmiştir. Farklı kuantum kuyu genişliklerine sahip numunelerin akım-voltaj eğrilerine bakıldığında ise, kuantum kuyu genişliğinin artmasıyla kuyu içindeki enerji seviyelerinin azaldığı ve tınlaşım tünelleme olayının daha erken voltaj değerlerinde gözlemlendiği görülmüştür. Ayrıca daha geniş kuantum kuyuya sahip numunelerin akım-voltaj grafiklerinde üst enerji seviyelerinden de tınlaşım tünellemenin gerçekleştiği gözlenmiştir. Bu çalışmalara ek olarak, yüzey kaçak akımlarını engellemek için numunelere fotorezist pasivasyonu yapılmış ancak yapılan düşük sıcaklık I-V ölçümlerinde numuneler üzerinde bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Yapı içindeki enerji seviyeleri hakkında daha fazla bilgi almak için, bazı numunelerde (AS-1, AS-2 ve AS-7) voltaj bağımlı fotoluminesans (E-PL) ölçümleri yapılmıştır. Katkılı (AS-2) ve katkısız (AS-1) numunelerin E-PL ölçümlerinde, voltajın artmasıyla birlikte PL sinyalinin şiddetinde artış olduğu ve tınlama durumun bozulduğu voltaj değerinden daha büyük voltaj değerlerine çıkıldıkça da PL sinyalinde düşüşler gözlenmiştir. E-PL ölçümünde $\sim 1,61$ eV değerine karşılık gelen kuantum kuyu enerji seviyesindeki sinyal şiddetinin voltaja bağlı değişimleri karşılaştırıldığında, AS-2 kod numaralı örnekte kuyu içine katkılanmış safsızlık atomlarından dolayı PL şiddetindeki azalmanın daha küçük voltaj değerinde olduğu gözlenmiştir. Bu durum, elektriksel ölçümler ile de doğrulanmıştır. AS-7 kod numaralı numunenin E-PL ölçümünde, uygulanan voltajla beraber kuantum kuyu taban enerjisinden gelen sinyal şiddetinde artma ve sonrasında azalma, küçük enerjiye doğru kayma, sinyalde çatallanma ve uygulanan büyük voltaj değerlerinde küçük enerji kısmının baskın hale gelmesi gözlenmiştir. Bu kaymanın sebebinin, kuantum sınırlı Stark etkisi (quantum-confined Stark effect – QCSE) olduğu düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] Nag, B. R., "Physics of Quantum Well Devices", Newyork: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [2] Lin, Y., van Rheenen, A.D. ve Chou, S.Y., "Current Fluctuations in Double-Barrier Quantum Well Resonant Tunnelling Diodes", *Appl. Phys. Lett.*, **59**, no. 9, 1991.
- [3] Feiginov, M., Sydlo, C., Cojocari, O. ve Meissner, P., "Resonant-tunnelling-diode oscillators operating at frequencies above 1.1 THz", *Appl. Phys. Lett.*, **99**, no. 233506, 2011.
- [4] Gobato, Y. G., Galeti, H. V. A., dos Santos, L. F., Lo'pez-Richard, V. , Cesar, D. F., Marques, G. E., Brasil, M. J. S. P., Orlita, M., Kunc, J., Maude, D. K., Henini, M. ve Airey, R. J., "Spin injection from two-dimensional electron and hole gases in resonant tunneling diodes", *Appl. Phys. Lett.*, **99**, no. 233507, 2011.
- [5] http://apl.aip.org/features/most_downloaded?track=APLFEB12EM.
- [6] Tsu, R. ve Esaki, L., "Tunelling in a Finite Superlattice", *Appl. Phys. Lett.*, **22**, no. 562, 1973.
- [7] Chang, L. L., Esaki, L. ve Tsu, R., "Resonant tunneling in semiconductor double barriers", *Appl. Phys. Lett.*, **24**, no. 593 , 1974.
- [8] G. W. Bryant, "Resonant tunneling in zero-dimensional nanostructures", *Phys. Rev. B*, **39**, no. 3145, 1989.
- [9] G. W. Bryant, "Understanding quantum-box resonant-tunneling spectroscopy: Fine structure at Fermi-level crossings", *Phys. Rev. B*, **44**, no. 3782, 1991.
- [10] G. W. Bryant, "Nonadiabatic transport through quantum dots", *Phys. Rev. B*, **44**, no. 12837, 1991.

- [11] Luban, M., Luscombe, J.H., Reed, M.A. ve Pursey, D.L., "Anharmonic oscillator model of a quantum dot nanostructure", *Appl. Phys. Lett.*, **54**, no. 1997, 1989.
- [12] Barker, J. R., "Proceedings of the International Symposium", Academic Press, Texas, 1989.
- [13] Sols, F., Macucci, M., Ravaioli, U.ve Hess, K., "Theory for a quantum modulated transistor", *Appl. Phys*, **66**, p. 3892, 1989.
- [14] Brum, J. A., "Twentieth International Conference on the Physics of Semiconductors", World Scientific, Thessaloniki, 1990.
- [15] Mizuta, H., ve Tanoue, T., "The Physics and Applications Of Resonant Tunnelling Diodes", Cambridge üniversitesi, Cambridge, 2006.
- [16] Gueret, P., Blanc, N., Germann, R.ve Rothuizen, H., "Vertical transport in Schottky-gated, laterally confined double-barrier quantum well heterostructures", *Surface Science* , **263**, no. 212, 1992.
- [17] Bo Su, Goldman, V. J. ve Cunningham, J. E., "Single-electron tunneling in nanometer-scale double-barrier heterostructure devices", *Phys. Rev. B*, **46**, no. 7644, 1992.
- [18] Van Hoof, C., Goovaerts, E. ve Borghs, G., "Sequential hole tunneling in n-type AlAs/ GaAs resonant-tunneling structures from time-resolved photoluminescence", *Phys. Rev. B*, **46**, no. 6982, 1992.
- [19] Roberts, G. A., Finley, J. J., Skolnick, M. S., Eaves, L., Cockburn, J. W., Larkin, I. A., Henini, M. ve Hill, G., "Voltage-controlled sharp-line electroluminescence in GaAs-AlAs double-barrier resonant-tunneling structures", *Phys. Rev. B* , **58**, no. 4242, 1998.
- [20] Vodjdani, N., Cote, D., Thomas, D., Sermage, B., Bois, P., Costard, E. ve Nagle, J., "Electrical and optical evidence of resonant tunneling of holes in an n⁺ in⁺ double-barrier diode structure under illumination", *App. Phys. Let.*, **56**, no. 33, 1990.
- [21] 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.,

- "Tunneling through the Bound States of a Single Donor Atom in a Quantum Well", *Phys. Rev. Lett.*, **68**, no. 1754, 1992.
- [22] Schmidt, T., Tewordt, M., Haug, R. J., v. Klitzing, K., Schonherr, B. ve Grambow, P., " Peak-to-valley ratio of small resonant-tunneling diodes with various barrier-thickness asymmetries, *App. Phys. Lett.*, **68**, no. 838, 1996.
- [23] Sakai, J. W., Main, P. C., Beton, P. H., La Scala, N., Geim, Jr., A. K., Eaves, L. ve Henini, M., " Zero-dimensional states in macroscopic resonant tunneling devices", *Appl. Phys. Lett.*, **64**, no. 2563, 1994.
- [24] Allison, G., Mori, N., Patane`, A., Endicott, J., Eaves, L., Maude D. K. ve Hopkinson, M., " Strong Effect of Resonant Impurities on Landau-Level Quantization", *Phys. Rev. Lett.*, **96**, no. 236802, 2006.
- [25] Bamham, K., Ballard, I., Barnes, J., Connolly, J. ve Griffin, P., " Quantum well solar cells" *Appl. Surf. Sci.*, **113-114**, 1997.
- [26] Rogalski, A., "Infrared Detectors", CRC Press Taylor & Francis Group Boca Raton, U.S., 2011.
- [27] Chowdharya, S., Singh, L.J. ve Ghatak, K.P., "The electronic contribution to the elastic constants in strained layer quantum well superlattices of non-parabolic semiconductors with graded interfaces under magnetic quantization: Simplified theory and suggestion for experimental determination", *Physica B*, **365**, no. 5, 2005.
- [28] Harrison, P., "Quantum Wells, Wires and Dots", Jhon Wiley & Sons Ltd, İngiltere, 2009.
- [29] Gasiorowicz, S., "Quantum Physics", JohnWiley & Sons, Inc., Kanada, 1974.
- [30] Zhao, P., Cui, H. L., Woolard, D. L., Jensen, K. L. ve Buot, F. A., "Equivalent Circuit Parameters of Resonant Tunneling Diodes Extracted from Self-Consistent Wigner–Poisson Simulation", *IEEE T. Electron Dev.*, **48**, no. 4, 2001.

- [31] Lamberti, C., “Characterization of Semiconductor Heterostructures and Nanostructures”, ELSEVIER, Amsterdam, 2008.
- [32] Korkmaz, G., Yayınlanmamış Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2015.
- [33] Fox, M., “Quantum Wells, Superlattices, and Band-Gap Engineering”, *Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials (Eds: Safa Kasap, Peter Capper)*, Springer Science+Business Media, Inc, New York, A.B.D., 2006.
- [34] Li, S. M., Zheng, W. M., Wu, A. L., Cong, W. Y., Liu, J., Chu, N. N. Ve Song, Y. X., “Terahertz electroluminescence from Be -doped GaAs/AlAs quantum well”, *App. Phys. Let.*, **97**, no. 23507, 2010.
- [35] Yıldırım, H. ve Aslan B., “Donor-related third-order optical nonlinearities in GaAs /AlGaAs quantum wells at the THz region”, *Semicond. Sci. Technol.*, **26**, 2011.
- [36] 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., “Impurity bound-to-unbound terahertz sensors based on beryllium and silicon δ -doped GaAs / AlAs multiple quantum wells”, *App. Phys. Let.* , **92**, no. 053503, 2008.
- [37] Bastard, G., “Hydrogenic impurity states in a quantum well: A simple model”, *Phys. Rev. B*, **24**, no. 4714, 1981.