

**GaAs/AlGaAs**  
**TABANLI KUANTUM KUYULARININ**  
**OPTİKSEL ve ELEKTRİKSEL**  
**KARAKTERİZASYONU**

Hülya KURU  
Yüksek Lisans Tezi

Fizik Anabilim Dalı  
Eylül-2010

Bu tez çalışması TBAG-107T012 numaralı proje kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

**Hülya KURU**'nun "**GaAs/AlGaAs Tabanlı Kuantum Kuyularının Optiksel ve Elektriksel Karakterizasyonu**" başlıklı **Fizik** Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 13.08.2010 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	<b>Adı-Soyadı</b>	<b>İmza</b>
<b>Üye (Tez Danışmanı)</b>	<b>: Doç. Dr. UĞUR SERİNCAN</b>	.....
<b>Üye</b>	<b>: Prof. Dr. AYDIN DOĞAN</b>	.....
<b>Üye</b>	<b>: Doç. Dr. BÜLENT ASLAN</b>	.....

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

**Enstitü Müdürü**

**ÖZET****Yüksek Lisans Tezi****GaAs/AlGaAs TABANLI KUANTUM KUYULARININ  
OPTİKSEL ve ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU****Hülya KURU****Anadolu Üniversitesi****Fen Bilimleri Enstitüsü****Fizik Anabilim Dalı****Danışman: Doç. Dr. Uğur SERİNCAN****2010, 98 sayfa**

Bu çalışmada, 7-12  $\mu\text{m}$  tayf bölgesini algılayabilen GaAs/AlGaAs kuantum kuyu kızılötesi foto algılayıcı olarak tasarlanan yapılar araştırıldı. Aygıt haline getirilen yapılar akım-voltaj, voltaj/sıcaklık bağımlı fotolüminesans ve fototepki ölçümleri kullanılarak incelendi.

Voltaj ve sıcaklık bağımlı PL ölçümleri, yapının kuantum kuyularındaki enerji seviyelerinin belirlenmesinde kullanıldı. Farklı büyüklüklerde üretilen aygıtların akım-voltaj karakteristikleri aynı akım yoğunlukları ile sonuçlanmış ve büyütülen yapının düzgünlüğü gösterilmiştir. Fototepki ölçümleri sonucunda, 3 yapının da tasarlanma amacına uygun olarak 7-12  $\mu\text{m}$  tayf bölgesinde çalıştığı tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Fotolüminesans, GaAs/AlGaAs, kuantum kuyu, fototepki, akım-voltaj karakteristiği

**ABSTRACT****Master of Science Thesis****OPTICAL and ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF  
GaAs/AlGaAs QUANTUM WELLS****Hülya KURU****Anadolu University  
Graduate School of Sciences  
Physics Program****Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Uğur SERİNCAN****2010, 98 pages**

In this study, we report on the investigation of a multilayer GaAs/AlGaAs quantum well infrared photodetector designed for 7-12  $\mu\text{m}$  spectral range detection. Fabricated devices were characterized by performing current-voltage, voltage/temperature dependent photoluminescence and photoresponse measurements.

The voltage and temperature dependence of photoluminescence was used to probe the energy levels of quantum wells. The current-voltage characteristics for the devices of different sizes resulted in the same current density assuring the uniformity of the grown wafers. Photoresponse measurements showed that all structures have responses at 7-12  $\mu\text{m}$  spectral region as designed.

**Keywords:** Photoluminescence, GaAs/AlGaAs, quantum well, photoresponse, current-voltage characteristic

## TEŞEKKÜR

Çalışmam sırasında bana yol gösteren, değerli bilgi ve yardımlarını esirgemeyen, bana her konuda destek olan ve bilimsel katkılarını çalışmamın her aşamasında gördüğüm kıymetli hocam Doç. Dr. Uğur SERİNCAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tezimde karakterizasyonunu yaptığım yapıların tasarımını yapan, çalışmamın her aşamasında her tür yardım ve desteklerini gördüğüm, değerli yorum ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli hocam Doç. Dr. Bülent ASLAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

ODTÜ, Fizik Bölümü'nde fototepki ölçümleri için çalışma imkanı sunan Prof. Dr. Raşit Turan'a yardımları için teşekkür ederim.

Nanoboyut Araştırma Laboratuvarında yüksek lisans ve doktora öğrencileri Tuğçe KARAKULAK, Tuğba ERTEN, Bülent ARIKAN, Güven KORKMAZ, Ayşe ŞEVİK ve yapılarımın cihaz haline getirilmesinde etkin rol oynayan Burcu ARPAPAY'a yapmış oldukları teknik yardım, hoş sohbet ve güzel bir arkadaşlık ortamı için teşekkür ederim.

Her zor anımda yanına koştuğum canım arkadaşım Seval AKSOY'a tatlı tebessümü ve sevgi dolu yüreğinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman olduğu gibi çalışmam boyunca da beni bir an yalnız bırakmayan, her konuda destekleyen kıymetli ailem, canım annem, babam ve kardeşime gösterdikleri sabır ve sevgiden dolayı teşekkürü bir borç bilirim. Sizleri çok seviyorum...

Ve bu çalışmayı aileme ithaf ediyorum...

Hülya KURU

Eylül 2010

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>iii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iv</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	<b>xi</b>
<b>KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	<b>xii</b>
<b>1. GİRİŞ VE AMAÇ</b>	<b>1</b>
<b>2. GaAs TABANLI YAPILAR, OPTİKSEL ve ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ</b>	<b>3</b>
2.1. GaAs/AlGaAs Bileşiği .....	3
2.2. Yasak Enerji Aralığı .....	6
2.2.1. Yasak enerji aralığının sıcaklığa bağlı değişimi .....	8
2.2.2. Yasak enerji aralığının katkıya bağlı değişimi .....	9
2.3. Düşük Boyutlu Yapılar .....	10
2.3.1. Kuantum sınırlaması .....	10
2.3.2. Kuantum kuyuları (tekli, çoklu) .....	11
2.4. Kızılötesi Algılayıcılar .....	13
2.4.1. Foton algılayıcılar .....	15
2.4.2. Kuantum kuyu IR algılayıcılar .....	16
2.4.2.1. Karanlık Akım .....	18

2.4.2.2. BLIP Sıcaklığı .....	19
2.4.2.3. Çok renkli ve çoklu tayfsal yapıya sahip algılayıcı uygulamaları .....	19
2.5. Lüminesans .....	22
2.5.1. Yeniden birleşme mekanizmaları .....	22
2.5.1.1. Bantlar arası geçişler .....	22
2.5.1.2. Safsızlık merkezi yeniden birleşmesi .....	24
2.5.1.3. Ekziton yeniden birleşmesi .....	25
2.5.2. Fotolüminesans spektroskopisi .....	26
2.5.2.1. Fotolüminesansın sıcaklığa bağlılığı .....	27
2.5.2.2 Yarıiletkenlerde fotolüminesansın uyarım şiddetine ve enerjisine bağlılığı .....	28
2.6. Çıplak Örneklerin Aygıt Haline Getirilmesi .....	29
<b>3. DENEYSEL TEKNİKLER VE ÖRNEK YAPISI</b>	<b>31</b>
3.1. Epitaksiyel Büyütme .....	31
3.2. Örnek Yapısı .....	32
3.3. Enerji Seviyeleri .....	34
3.4. Aygıt Üretimi: GaAs/Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As Örneklerinin Aygıt Haline Getirilmesi .....	36
3.5. Akım-Voltaj Ölçüm Düzeneği .....	37
3.6. Fotolüminesans Deney Düzeneği .....	38
3.7. Fototepki Ölçümleri .....	39

<b>4. GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As ALGILAYICILARIN OPTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ</b>	<b>42</b>
4.1. PL Ölçümleri .....	42
4.1.1. Sıcaklık bağımlı PL ölçümleri .....	44
4.1.2. Voltaj Bağımlı PL Ölçümleri .....	50
<b>5. GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As ALGILAYICILARIN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ</b>	<b>54</b>
5.1. Akım - Voltaj Ölçümleri .....	54
5.2. BLIP Sıcaklığı .....	60
5.3. Aktivasyon Enerjisi .....	64
5.4. Yapıların Kıyaslaması .....	68
<b>6. GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As ALGILAYICILARININ FOTOTEPKİSİNİN ÖLÇÜLMESİ</b>	<b>74</b>
6.1. GaAs/AlGaAs Çoklu Algılayıcılarında Fototepkinin Ölçülmesi .....	74
<b>7. SONUÇ</b>	<b>80</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>82</b>



## ŞEKİLLER DİZİNİ

2.1.	Anadolu Üniversitesi, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda kurulu MBE sisteminin genel görünüşü .....	3
2.2.	GaAs ve AlAs'ın örgü sabitleri .....	4
2.3.	GaAs'ın bant yapısı .....	7
2.4.	Yasak enerji aralığının katkı konsantrasyonu ile değişimi .....	9
2.5.	GaAs/AlGaAs (a) tekli kuantum kuyusunun, (b) çoklu kuantum kuyu veya süperörgü yapının şematik diyagramı .....	12
2.6.	Atmosferik pencere .....	14
2.7.	İdeal kuantum verimliliğinin kesim dalgaboyuna bağlı grafiği .....	16
2.8.	Üç farklı çok renkli QWIP yaklaşımı. (a) Çoklu istiflenme ile büyütülen iki farklı dalgaboyu tepkisine sahip QWIP'ler (b) $V_1$ voltajında $\lambda_1$ dalgaboyu ve $V_2$ voltajında $\lambda_2$ dalgaboyu tepkisine sahip QWIP (c) Uygulanan voltaj değeriyle değiştirilebilen sürekli bir tepkiye sahip olan QWIP .....	20
2.9.	Voltaj bağlı spektruma sahip QWIP'lerde kullanılan aşamalı kuantum kuyu bant kenar profili .....	21
2.10.	(a) Doğrudan bant aralığına sahip yarıiletken için ve (b) Dolaylı bant aralığına sahip yarıiletken için bantlar arası geçişler .....	23
2.11.	(a) Elektronun iletkenlik bandından boş alıcı (acceptor) seviyelerine inmesi (b) verici (donor) seviyesindeki bir elektron değerlik bandındaki bir boşlukla yeniden birleşmesi (c) verici seviyesindeki elektronun boş alıcı seviyesine düşmesi .....	24
2.12.	Fotolitografi aşamaları .....	30
3.1.	Yapı 1'in iletkenlik bandı, şematik gösterimi .....	32
3.2.	Yapı 2'nin iletkenlik bandı, şematik gösterimi .....	33
3.3.	Yapı 3'ün iletkenlik bandı, şematik gösterimi .....	34
3.4.	$d$ kuyu genişliğindeki GaAs ve $Al_xGa_{1-x}As$ bariyerine sahip olan kuantum kuyusunda enerji düzeyleri ve bantlar arası geçiş modeli ...	35
3.5.	Yapı 2'nin paketlenmiş hali .....	37
3.6.	Akım-Voltaj Ölçüm Düzeneği .....	38

3.7.	Deneyde kullanılan voltaj bağımlı PL ölçüm sistemi .....	40
3.8.	Fototepki ölçümlerinin alındığı FTIR düzeneği .....	41
4.1.	Yapı 3'ün 10 K'deki PL tayfi ve teorik olarak hesaplanan enerji geçişleri .....	43
4.2.	Sıcaklık bağımlı PL düzeneği .....	44
4.3.	Yapı 1'in sıcaklık bağımlı PL ölçümleri .....	45
4.4.	Sıcaklıkla, Yapı 1'deki tepe 2'nin enerji ve PL şiddetindeki değişim	46
4.5.	Yapı 1'deki GaAs'ın sıcaklıkla enerji ve PL şiddetindeki değişim ...	47
4.6.	Yapı 2'nin sıcaklık bağımlı PL ölçümleri .....	47
4.7.	Sıcaklığa bağımlı, Yapı 2'deki tepe 2'nin enerji ve PL şiddetindeki değişim .....	48
4.8.	Yapı 3'ün sıcaklık bağımlı PL ölçümleri .....	49
4.9.	Sıcaklığa bağımlı, Yapı 3'deki tepe 2'nin enerji ve PL şiddetindeki değişim .....	49
4.10.	Yapı 2'nin 80 K'de voltaj bağımlı PL ölçümleri .....	51
4.11.	Yapı 3'ün 80 K'de voltaj bağımlı PL ölçümleri .....	52
4.12.	Yapı 3'ün 10 K'de lazer şiddetine bağımlı PL ölçümleri .....	52
5.1.	Yapı 1 için 80 K'de farklı büyüklükteki masatepelerin akım yoğunluğu-voltaj grafiği .....	54
5.2.	Yapı 2 için 80 K'de farklı büyüklükteki masatepelerin akım yoğunluğu-voltaj grafiği .....	55
5.3.	Yapı 3 için 80 K'de farklı büyüklükteki masatepelerin akım yoğunluğu-voltaj grafiği .....	55
5.4.	Yapı 1 400×400 $\mu\text{m}^2$ masatepe yapısı için farklı sıcaklıklarda gözlenen karanlık akım-voltaj grafiği .....	57
5.5.	Yapı 1 1000×1000 $\mu\text{m}^2$ masatepe yapısı için farklı sıcaklıklarda gözlenen karanlık akım-voltaj grafikleri .....	57
5.6.	Yapı 2 800×800 $\mu\text{m}^2$ masatepe yapısı için farklı sıcaklıklarda gözlenen karanlık akım-voltaj grafiği .....	59
5.7.	Yapı 3 1000×1000 $\mu\text{m}^2$ masatepe yapısı için farklı sıcaklıklarda gözlenen karanlık akım-voltaj grafiği .....	60
5.8.	Yapı 1 400×400 $\mu\text{m}^2$ masatepe yapısı için aydınlık-karanlık akım	61

ölçüm grafikleri. ....	
5.9. Yapı 1 1000×1000 $\mu\text{m}^2$ masatepe yapısı için aydınlık-karanlık akım ölçümleri .....	61
5.10. Yapı 2 800×800 $\mu\text{m}^2$ masatepe yapısı için aydınlık-karanlık akım ölçümleri .....	62
5.11. Yapı 3 1000×1000 $\mu\text{m}^2$ masatepe yapısı için aydınlık-karanlık akım ölçümleri .....	62
5.12. Yapı 1, 2 ve 3'ün voltaj bağlı BLIP sıcaklıklarının kıyaslanması ....	63
5.13. Yapı 1'in $\text{Ln}(J/T^2)$ 'nin $1/kT$ göre grafiğinden aktivasyon enerjileri	64
5.14. Yapı 1 için aktivasyon enerjisinin voltajla ters orantılı olarak değişimini gösteren grafik .....	65
5.15. Yapı 2'nin $\text{Ln}(J/T^2)$ 'nin $1/kT$ göre grafiğinden aktivasyon enerjileri..	66
5.16. Yapı 2 için aktivasyon enerjisinin voltajla ters orantılı olarak değişimi	66
5.17. Yapı 3'ün $\text{Ln}(J/T^2)$ 'nin $1/kT$ göre grafiğinden aktivasyon enerjileri ..	67
5.18. Yapı 1, 2 ve 3'ün aktivasyon enerjilerinin kıyaslanması .....	68
5.19. Yapı 1, 2 ve 3 için 20 K'de akım yoğunluğu - voltaj grafikleri .....	69
5.20. Yapı 1, 2 ve 3 için 30 K'de akım yoğunluğu - voltaj grafiklerinin kıyaslanması .....	69
5.21. Yapı 1, 2 ve 3 için 40 K'de akım yoğunluğu - voltaj grafiklerinin kıyaslanması .....	70
5.22. Yapı 1, 2 ve 3 için 50 K'de akım yoğunluğu - voltaj grafiklerinin kıyaslanması .....	70
5.23. Yapı 1, 2 ve 3 için 60 K'de akım yoğunluğu - voltaj grafiklerinin kıyaslanması .....	71
5.24. Yapı 1, 2 ve 3 için 70 K'de akım yoğunluğu - voltaj grafiklerinin kıyaslanması .....	71
5.25. Yapı 1, 2 ve 3 için 80 K'de akım yoğunluğu - voltaj grafiklerinin kıyaslanması .....	72
5.26. Yapı 1 ve 2'nin düğüm noktaları voltaj değerlerinin sıcaklığa bağlı grafiği .....	73
6.1. Yapı 1'in voltaja bağlı fototepki ölçümleri .....	75
6.2. Yapı 2'nin voltaja bağlı fototepki ölçümleri .....	77

6.3.	Yapı 3'ün voltaja bağlı fototepki ölçümleri .....	78
6.4.	Sabit voltaj altında Yapı 1, 2 ve 3 için foto-tepki ölçümlerinin kıyaslanması .....	79

**ÇİZELGELER DİZİNİ**

2.1.	GaAs AlGaAs bileşiklerinin oda sıcaklığındaki sabit verileri .....	5
3.1.	Yapı 1, 2 ve 3’de bulunan 50-60-70 Å genişliğindeki kuantum kuyularının enerji seviyeleri .....	35
3.2.	Yapı 1, 2 ve 3’de bulunan AlGaAs bariyerlerinin konsantrasyona bağlı bant aralığı enerjileri .....	35
6.1.	Fototepki ölçümlerinde Yapı 1, 1000×1000 µm <sup>2</sup> masatepe için uygulanan voltaja bağlı olarak elde edilen akım değerleri .....	74
6.2.	Fototepki ölçümlerinde Yapı 2, 800×800 µm <sup>2</sup> masatepe için uygulanan voltaja bağlı olarak elde edilen akım değerleri .....	76
6.3.	Fototepki ölçümlerinde Yapı 3, 1000×1000 µm <sup>2</sup> masatepe için uygulanan voltaja bağlı olarak elde edilen akım değerleri .....	77

**KISALTMALAR DİZİNİ**

BLIP	: Arkaplan sınırlı kızılötesi başarımlı
DT	: Doğrudan tünelleme
EL	: Elektrolüminesans
FWHM	: Yarı yükseklikte tam genişlik değeri
FPA	: Odak düzlem dizileri
FOV	: Yapının odayı görüş alanı
FTIR	: Fourier Transform Infrared spektroskopisi
IR	: Kızılötesi ışınım
MBE	: Moleküler Demet Epitaksi
MCT	: Cıva Kadmiyum Telür (Mercury Cadmium Telluride)
MQW	: Çoklu kuantum kuyuları
PC	: Fotoiletken
PL	: Fotolüminesans
PR	: Fototepki
TAT	: Isıl destekli tünelleme
TE	: Isıl olarak uyarılmış
QWIP	: Kuantum kuyulu yapılar

## 1. GİRİŞ

Sıcaklığı 0 K'den farklı her türlü cisim kızılötesi (IR) ışınım yapmaktadır. IR ışınım tayfı; kısa dalgaboylu IR (Short-wavelength infrared, SWIR) (1-3  $\mu\text{m}$ ), orta dalgaboylu IR (mid-wavelength infrared, MWIR) (3-5  $\mu\text{m}$ ), uzun dalgaboylu IR (LWIR) (8-12  $\mu\text{m}$ ) ve çok uzun dalgaboylu IR (Very long wavelength infrared, VLWIR) (12  $\mu\text{m}$ ) bölgeleri kapsamaktadır.

IR algılayıcılar, 1800 yılında IR ışınımın keşfinden beri araştırılmakta ve özellikle askeri alanda geniş kullanım alanları oluşması nedeniyle günümüzde yoğun olarak çalışılmaktadır. Kızılötesi algılayıcıların, kullanılma amaçlarına göre çalıştıkları dalgaboyu aralıkları değişmektedir. Askeri alanda, gece görüşü, gözetim, füze yönlendirme ve iz arama gibi uygulamaları mevcuttur. Ayrıca giderek üretim maliyetlerinin azalması nedeniyle, sivil alanlarda, özellikle sağlık alanında, uygulamaları gün geçtikçe artmaktadır.

Kızılötesi algılayıcı olarak Cıva Kadmiyum Telür (Mercury Cadmium Telluride, MCT) oldukça yaygın olarak bilinir. MCT'ler yüksek kuantum verimliliğine (%80) ve yüksek çalışma sıcaklığına sahip olmasına rağmen, çalışmak için zorlu bir malzemedir. MCT yapının tekrar edilmesi ve düzgün büyütülmesi açısından sorunlu olduğu gibi, yapının yumuşak olması da aygıt üretimini olumsuz etkilemektedir. QWIP'ler (kuantum kuyulu yapılar), MCT'lerin bu olumsuz etkilerine bir seçenek olarak ortaya çıkmış yapılardır. MCT algılayıcılarıyla kıyaslandığında, GaAs/AlGaAs QWIP'ler birçok avantaja sahiptir.

QWIP'ler bantlar ve altbantlar arası geçişleri temel olarak çalışan aygıtlardır. Çalışılacak bölgeye göre uygun kuyu genişliği ve engel yüksekliği seçilerek yapı oluşturulur. Bu sayede, belirli bir dalga boyuna sahip kızılötesi radyasyonun algılanması mümkün olabilmektedir.

Kızılötesini algılayabilen kuantum kuyularının opto-elektronikte kullanılmasının birçok sebebi vardır:

- ✓ QWIP'lerin ana avantajı III-V yarıiletkenlerinin doğasıyla ilişkili olarak tekrardan üretilebilirlik ve yapının her yerinde homojen olmasıdır.

- ✓ QWIP'ler fotoiletken kipte çalışan, yüksek dirence ve düşük güç tüketimine sahiptir.

Bunun yanı sıra QWIP'lerin ana sorunu düşük kuantum verimliliğidir (Tidrow ve ark. 1999).

GaAs/AlGaAs'ın QWIP'lerde yaygın olarak kullanılmasının sebebi, GaAs ve AlAs arasındaki mükemmel örgü uyumu ve bu malzemelerin büyütülebilmesinin nispeten kolay olmasıdır. Bunun yanında, GaAs alttaşların 6 inç büyüklüğe kadar tedarik edilebilmesi diğer yapılara göre üstünlük sağlamaktadır.

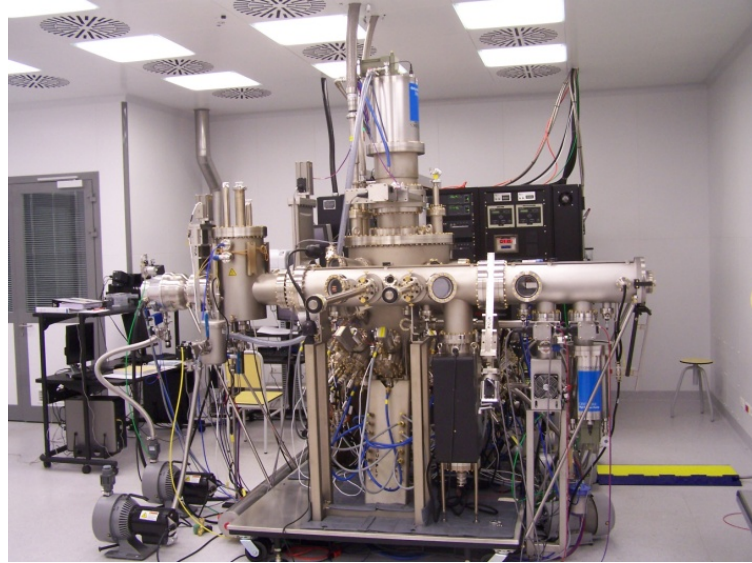
Bu çalışmada, MBE tekniği kullanılarak foto-algılayıcı olarak tasarlanan 3 değişik GaAs/AlGaAs çoklu kuantum yapısının optiksel ve elektriksel karakterizasyonu incelenmiştir.



## 2. GaAs TABANLI YAPILAR, OPTİKSEL ve ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ

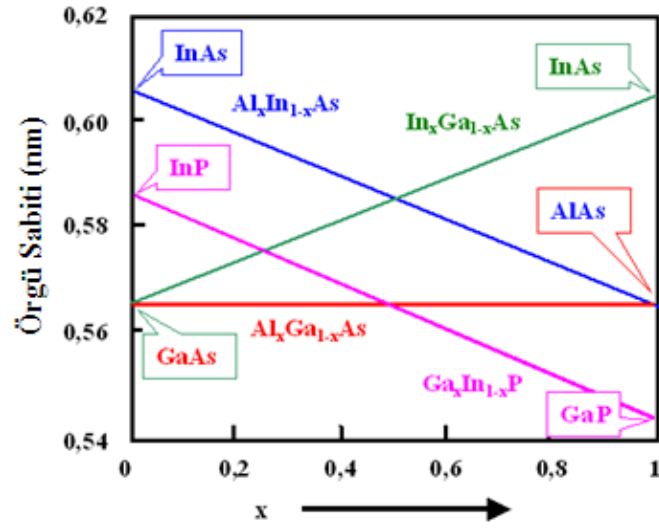
### 2.1. GaAs ve $Al_xGa_{1-x}As$ Bileşigi

III-V grubu bileşiklerinin yüksek kalitede büyütülmesi için birçok yöntem mevcuttur. Bunların arasında Moleküler Demet Epitaksi (Molecular Beam Epitaxy, MBE, Şekil 2.1) yöntemi yüksek saflık ve malzeme homojenliği açısından öne çıkmaktadır. Bu malzemelerin büyütülmesi sırasında ortaya çıkan önemli noktalardan birisi, malzeme içerisinde oluşacak kusurların en düşük seviyede tutulmasıdır. Bunun için, çalışılması düşünülen malzemelerin birbiriyle uyumlu olması kristal katmanların büyütülmesinde kritik öneme sahiptir. Bu tür uyumlu malzemeler içerisinde GaAs ve AlAs, III-V grubu bileşikleri içerisinde öne çıkmaktadır. Bunun başlıca nedeni Şekil 2.2'den de görülebileceği gibi birbiri arasındaki mükemmel örgü sabiti uyumudur.



**Şekil 2.1.** Anadolu Üniversitesi, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda kurulu MBE sisteminin genel görünüşü

III-V grubu yarıiletkenleri, elektromanyetik tayfin geniş bölgesinde hem ışık algılayıcı hem de ışık üretici olarak teknolojik uygulamalara sahiptir. GaAs ve AlAs, 300 K’de sırasıyla, 1,42 ve 2,16 eV bant aralığına sahiptir (Singleton 2001). Bu durumda  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  bileşiğinin bant aralığı, bileşikteki Al miktarı (x değeri) değiştirilerek 1,42 ile 2,16 eV arasında bir değere ayarlanabilir. Karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla GaAs ve  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  bileşiklerinin oda sıcaklığında sabit değişkenleri Çizelge 2.1’de verilmektedir.



Şekil 2.2. GaAs ve AlAs’ın örgü sabitleri (Föll 2010)

**Çizelge 2.1.** GaAs AlGaAs bileşiklerinin oda sıcaklığındaki sabit verileri (Levinshtein ve ark. 1996)

	<b>GaAs</b>	<b>Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As</b>
<b>Kristal Yapısı</b>	Çinko sülfür	Çinko sülfür
<b>Örgü Sabiti (Å)</b>	5,65325	5,6533+0,0078x
<b>Yasak Bant Aralığı (eV) (300 K)</b>	1,424	x<0,45 1,424+1,247x x>0,45 1,9+0,125x+0,143x <sup>2</sup>
<b>Elektron etkin kütlesi (m<sub>e</sub>/m<sub>0</sub>)</b>	0,063	0,063+0,083x (x<0,45)
<b>Boşluk etkin kütlesi (m<sub>e</sub>/m<sub>0</sub>)</b>	Ağır m <sub>hh</sub> 0,51	0,51+0,25x
	Hafif m <sub>lh</sub> 0,082	0,082+0,068x
<b>Erime Noktası (°C)</b>	1240	1240-58x+558x <sup>2</sup> (katı yüzey)
		1240+1082x-582x <sup>2</sup> (sıvı yüzey)
<b>Kırılma indisi</b>	3,255(1+4,5×10 <sup>-5</sup> T)	
<b>De Broglie Elektron Dalgaboyu (Å)</b>	370	370+54x+22x <sup>2</sup>
<b>1 cm<sup>3</sup> deki atom sayısı</b>	4,22×10 <sup>22</sup>	(4,22-0,17x)×10 <sup>22</sup>
<b>Debye Sıcaklığı (K)</b>	370	370+54x+22x <sup>2</sup>
<b>Dielektrik Sabiti</b>	12,90	12,90-2,84x
<b>Yüksek Frekanslı Dielektrik Sabiti</b>	10,89	10,89-2,73x
<b>İletkenlik Bandı Efektif DOS (cm<sup>-3</sup>)</b>	4,7×10 <sup>17</sup>	N <sub>c</sub> = 2,51×10 <sup>19</sup> (m <sub>e</sub> /m <sub>0</sub> ) <sup>3/2</sup>
<b>Değerlik Bandı Efektif DOS (cm<sup>-3</sup>)</b>	7×10 <sup>18</sup>	N <sub>v</sub> = 2,51×10 <sup>19</sup> (m <sub>h</sub> /m <sub>0</sub> ) <sup>3/2</sup>
<b>Optik Fonon Enerjisi (meV)</b>	36	36,25+1,83+17,12x <sup>2</sup> -5,11x <sup>3</sup>
<b>İşinimsal yeniden birleşme katsayısı (cm<sup>-3</sup>/s)</b>	7×10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-10</sup>

## 2.2. Yasak Enerji Aralığı

Bir atomda elektronlar kuantum koşullarına uygun kesikli seviyelerde Pauli ilkesine uygun olarak dizilirler. Serbest haldeki atomlar bir araya gelerek kristal yapıyı oluştururken, karşılıklı bağlanma kuvvetleri etkili hale gelir. Bu durumda, serbest haldeyken aynı enerjilerde bulunan atomlar, bir araya geldiklerinde birbirleriyle aynı enerjiye sahip olamayacakları için enerji düzeyleri yarılmalara uğrayarak enerji bantlarını oluştururlar. Bu enerji düzeyleri arasındaki fark çok küçük olduğu için ( $10^{-19}$  eV) sürekli bir banttan söz edilebilir (McKelvey 1966).

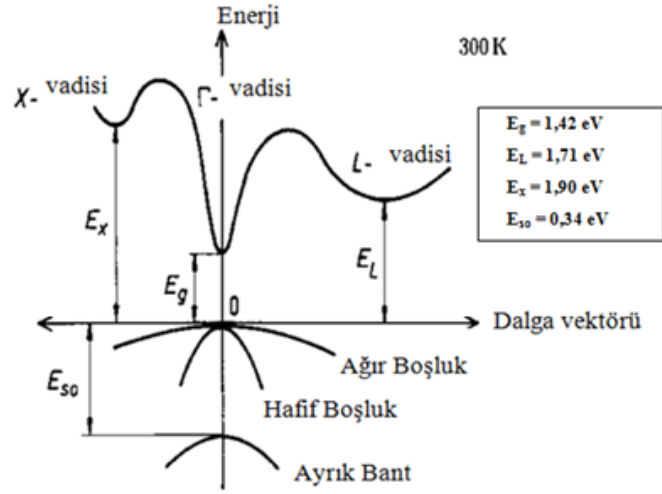
Elektronların dalga fonksiyonlarının kuvvetli etkileşmeleri sonucu dış yörüngelere ait enerji bantları, iç yörüngelerdekine göre daha geniştir çünkü iç yörüngelerdeki elektronlar komşu atomlardan daha az etkilenmektedirler. Genellikle dış bantlarda kuantum durumları ya boş ya da kısmen doludur. Bantlar oluştuktan sonra bantlar arasında elektron geçişleri, Pauli dışarlama ilkesine göre başlar ve istatistiksel denge kuruluncaya kadar devam eder. Böylece alt bantlar üst banttaki elektronlarla doldurulur. Dolu bant “*değerlik bandı*”, ve üstteki boş bant ise “*iletkenlik bandı*” olarak adlandırılır. İletkenlik bandı ile değerlik bandı arasındaki enerji aralığı, *yasak enerji aralığı* ( $E_g$ ) adını alır. Elektronlar bu iki bant arasında bulunmazlar (McKelvey 1966). Yarıiletkenlerin bant aralığı birkaç eV mertebesindedir.

Kristalde bulunan elektronlar bu enerji bantlarında hareket edebilirler. Kristalin örgü noktalarında bulunan atomların sahip oldukları potansiyel alanları, serbest elektronların ya da boşlukların hareketini belirler. Eğer kristal yapıda herhangi bir düzensizlik mevcutsa, elektronların ya da boşlukların hareketi bundan etkilenecektir. Kristal içerisinde meydana gelen bu düzensizliklere *kristal kusurları* denir. Kristal kusurları yarıiletkenin elektriksel özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir (Tyagi ve ark. 1991).

Değerlik bandı maksimumu, iletkenlik bandının minimumu ile aynı momentum ( $k$ ) değerine sahip yarıiletkenlere, doğrudan (direkt) bant aralıklı yarıiletkenler, farklı  $k$  değerinde bulunanlara ise dolaylı (indirekt) bant aralıklı yarıiletkenler denir. Şekil 2.3’deki GaAs’ın enerji-momentum ( $E-k$ ) ilişkisi

incelendiğinde doğrudan bant yapısına sahip olduğu görülmektedir (Wilson ve Hawkes 2000).

GaAs için 300 K'de  $E_g = 1,42$  eV değerine karşılık gelmektedir. GaAs'ın bant yapısı incelendiğinde, hafif boşluk (light hole) ve ağır boşluk (heavy hole) bantları  $k = 0$  noktasında dejeneredir. GaAs için, spin yarılmalarından kaynaklı *ayrık bant* olarak isimlendirilen üçüncü değerlik bandı, iki üst boşluk bandından 340 meV daha yukarıdadır.



Şekil 2.3. GaAs'ın bant yapısı (Jones 2001)

Yapı içerisinde bir fotonun soğrulup fotoelektron üretmesi durumunda, sistemin toplam enerjisi ve momentumu korunmalıdır. 1 eV enerjisi olan bir fotonun dalgaboyu  $10^{-6}$  m ( $\mu\text{m}$ ) mertebesindedir ve bu, atomlar arası mesafeden ( $R$ ) çok daha büyüktür. Fotonun momentumu  $h/\lambda$  olduğuna göre, sahip olduğu momentum değeri bir iletkenlik bandı elektronunun momentumu olan  $h/R$ 'den çok daha küçüktür (Hook ve Hall 1999). O halde, 1 eV enerjili fotonlar elektronların momentumunda önemli bir değişikliği sebep olmazlar ( $\Delta k \approx 0$ ). Bu durumda, doğrudan bant aralığına sahip yarıiletkenlerde elektron-boşluk çiftinin oluşması veya yeniden birleşmesi sırasında enerji ve momentumun korunumu için sadece foton soğurması ya da salınması yeterlidir.

Dolaylı bant aralıklı yarıiletkenlerde, foton soğurulmasının yanı sıra momentum korunumunun sağlanması için fonon da soğrulur. Fonon, örgü titreşiminin enerji paketidir. Fotonların aksine, fononlar büyük momentumlara ve küçük enerjilere sahiptirler. Momentumu  $h/R$  olan bir fonon  $k_B T_D$  mertebesinde bir enerjiye sahiptir; burada  $T_D$  Debye sıcaklığıdır ve bu çoğunlukla 1 eV'a kıyasla küçüktür. Sonuç olarak foton, elektronun enerji değişimini, fonon ise momentum değişimini sağlar (Hook ve Hall 1999).

### 2.2.1. Yasak enerji aralığının sıcaklığa bağlı değişimi

Yarıiletkenlerin sıcaklığı artırıldığında örgüde genleşme olur ve atomların dengedeki örgü noktalarındaki titreşimi artar. Bu durum, enerji bandında bir değişime sebep olduğu gibi enerji seviyelerinin genişlemesine de neden olur (Varshni 1967a). Bant aralığının sıcaklığa bağlı değişimi birçok yarıiletken için

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T+\beta} \quad (2.1)$$

eşitliğiyle belirlenmektedir. Burada,  $E_g(0)$ , 0 K'deki bant aralığı,  $\alpha$  ve  $\beta$  ise yarıiletkene özgü sabit değerlerdir. Bu değerler GaAs için,  $E_g(0) = 1,5216$  eV,  $\alpha = 8,871 \times 10^{-4}$  ve  $\beta = 572$ 'dir (Varshni 1967a).

Yarıiletkenlerde  $E_g$ 'in değişimi elektron-fonon saçılması ve kristal örgüsündeki ısıl genleşme olarak iki kısımda incelenebilir. Elektron-fonon etkileşimi olarak ifade edilen sıcaklığa bağlı etkileşim potansiyeli, iletim ve değerlik bandının konumunun değişimine nispeten büyük katkı sağlar. Bu etkileşim potansiyeli, sıcaklığın artmasıyla  $E_g$ 'nin azalmasına sebep olur. Denklem (2.1)'deki ikinci terim, payın sıcaklığa bağlı olarak değişme hızı ( $T^2$ ), paydanın değişme hızından ( $T+\beta$ ) fazla olduğu için artan bir fonksiyon durumundadır. Sonuç olarak, sıcaklık artışı  $E_g$ 'nin azalmasına sebep olur. Kristal örgüsündeki ısıl genleşmenin etkisi, elektron-fonon etkileşimin katkısıyla kıyaslandığında daha küçük bir etkidir.

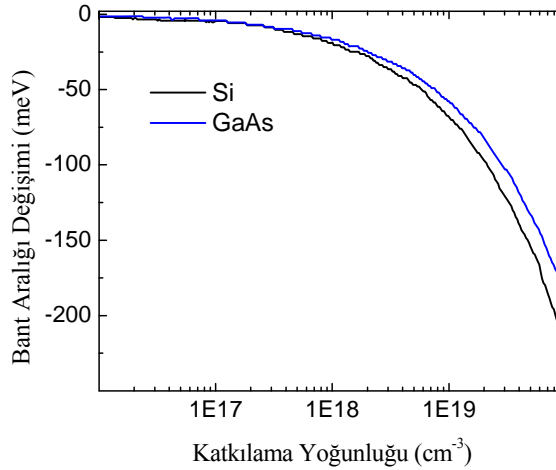
### 2.2.2. Yasak enerji aralığının katkıya bağlı değişimi

Katkılı yarıiletkenlerin yasak enerji aralığında, katkı yoğunluğuna göre değişimler gözlemlenir. Şekil 2.4 görüldüğü gibi özellikle yüksek katkı yoğunluğu, yasak enerji aralığının büzülmesine neden olur (Zeghbroeck 2007). Bu olay, katkı atomlarındaki bağlı elektronların dalga fonksiyonlarının, katkı yoğunluğunun artması sonucu üst üste binmeye başlaması nedeniyle ortaya çıkar. Bu üst üste binme kuvvetleri ayırık seviyeler oluşturmak yerine yasak enerji bölgesinde bir enerji bandı oluşturur. Bu durumda, bant aralığındaki azalma

$$\Delta E_g(N) = \frac{-3q^2}{16\pi\epsilon_s} \sqrt{\frac{q^2 N}{\epsilon_s kT}} \quad (2.2)$$

eşitliğiyle ifade edilir (Zeghbroeck 2007). Burada,  $N$  katkı yoğunluğu,  $q$  elektriksel yük,  $\epsilon_s$  yarıiletkenin dielektrik sabiti,  $k$  Boltzman sabiti,  $T$  K cinsinden sıcaklıktır.

Şekil 2.4'de GaAs ve Si'nin katkı konsantrasyonuna bağlı olarak bant aralığı değişimini göstermektedir. GaAs'ın bant aralığı azalması  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  katkı konsantrasyonundan daha küçük konsantrasyonlarda ihmal edilebilir.



Şekil 2.4. Yasak enerji aralığının katkı konsantrasyonu ile değişimi (Zeghbroeck 2007)

## 2.3. Düşük Boyutlu Yapılar

### 2.3.1. Kuantum sınırlaması

Makro boyutlarda, katı maddelerin optik özellikleri maddenin boyutlarına bağlı değildir. Eğer kristalin boyutlarını küçültürsek, kristalin optik özellikleri boyutlarına bağlı olacaktır çünkü yapı kuantum sınırlamasının etkisini hissetmeye başlayacaktır. Heisenberg belirsizlik ilkesine göre bir parçacık  $x$  ekseninde  $\Delta x$  uzunluğunda sınırlanırsa, momentumda bir belirsizlikle karşılaşılır;

$$\Delta p_x \approx \frac{\hbar}{\Delta x} \quad (2.3)$$

Eğer parçacık diğer yönlerde serbestse ve  $m$  kütlesine sahipse,  $x$  doğrultusundaki sınırlama parçacığa ek bir kinetik enerji kazandırır.

$$E_{\text{sınırlama}} = \frac{(\Delta p_x)^2}{2m} \approx \frac{\hbar^2}{2m(\Delta x)^2} \quad (2.4)$$

Bu sınırlanmış enerji, parçacığın  $x$  doğrultusundaki ısı hareketinden kaynaklı kinetik enerjisiyle kıyaslanabilir veya daha büyük değere sahipse, önemlidir. Bu durum,

$$E_{\text{sınırlama}} \approx \frac{\hbar^2}{2m(\Delta x)^2} > \frac{1}{2} k_B T \quad (2.5)$$

şeklinde yazılabilir. Öyleyse, parçacığın sınırlandığı mesafe

$$\Delta x \approx \sqrt{\frac{\hbar^2}{mk_B T}} \quad (2.6)$$

olduğu durumunda, kuantum sınırlama etkileri önemli olmaya başlar.

Son yıllarda sıklıkla duyulan ve yarıiletken malzemeler kullanılarak yapılabilen kuantum sınırlamasının olduğu yapılar, sınırlama boyutuna göre şöyle sıralanabilir;



Kuantum kuyular (1 boyutta kısıtlama)

Kuantum teller (2 boyutta kısıtlama)

Kuantum noktalar (3 boyutta kısıtlama).

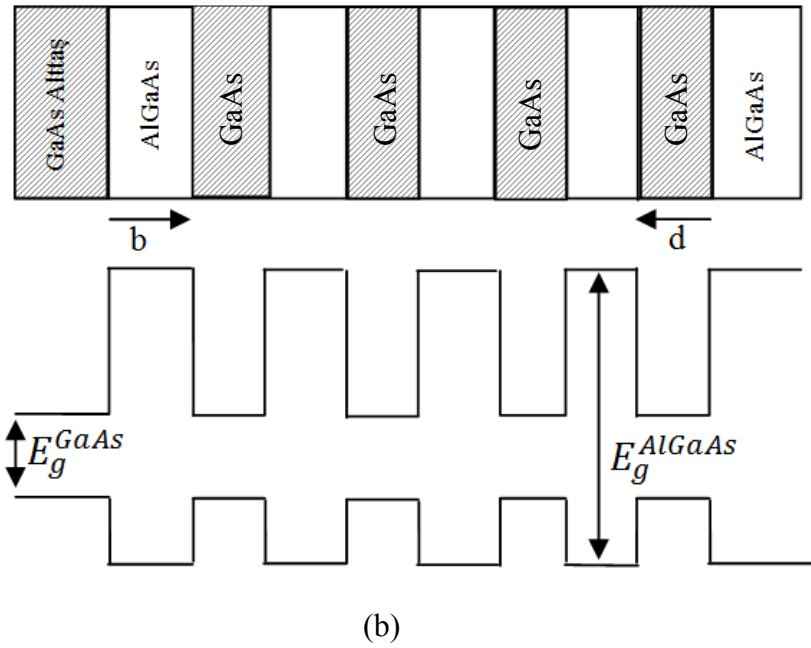
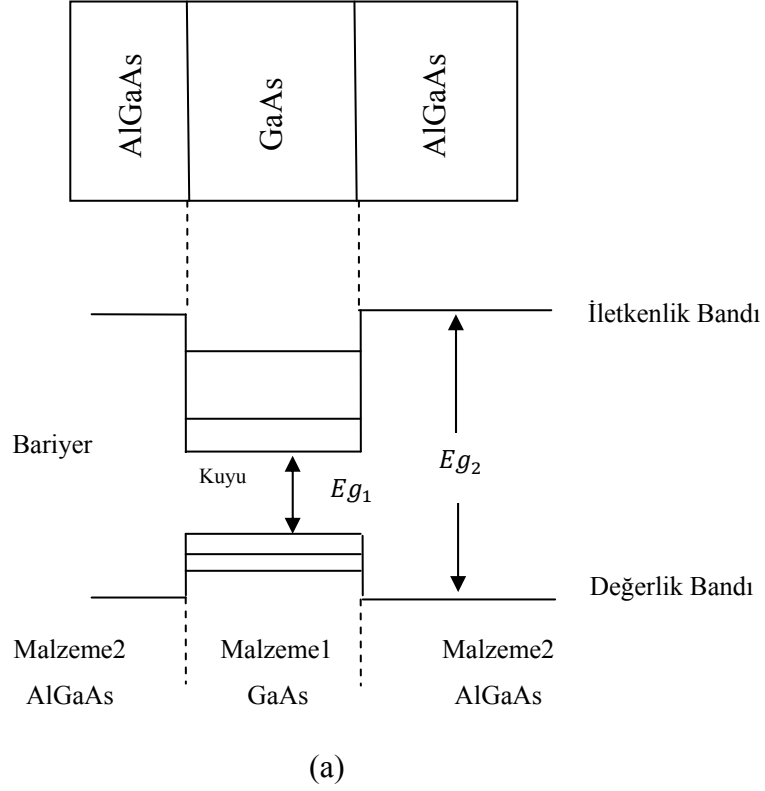
Yani, bu yapılar içindeki elektron ve boşluklar sırasıyla, 2, 1 ve 0 serbestlik derecesine sahiptirler.

### 2.3.2. Kuantum kuyuları (tekli, çoklu)

Çoklu yapı sistemlerinin en basitini kuantum kuyuları oluşturmaktadır. Kuantum kuyu kavramı ilk olarak Esaki ve Tsu tarafından 1970 yılında kullanılmıştır. Kuantum kuyuları ilginç optik özelliklere sahip olmasından dolayı opto-elektronik uygulamalarında sıkça kullanılmıştır (Fox 2001).

Şekil 2.5a, GaAs/AlGaAs kuantum kuyusunun şematik çizimini göstermektedir. AlGaAs alaşım yarıiletkeninin tabakaları arasında  $d$  kalınlığında sandviçlenmiş GaAs tabakasındaki elektronların hareketi sınırlandırılmıştır. AlGaAs'ın bant aralığı, GaAs'inkinden daha büyüktür; GaAs'nın iletkenlik bandı minimumu ve değerlik bandının maksimumu, AlGaAs'ın bant aralığının içinde kalır. Dolayısıyla, GaAs tabakasındaki elektronlar, iletkenlik bantlarındaki süreksizliklerden dolayı oluşan her iki taraftaki potansiyel engeller tarafından tuzaklanır. Benzer şekilde; boşluklar da değerlik bandındaki süreksizliklerden dolayı tuzaklanır. Şekil 2.5a'da GaAs'ın AlGaAs tarafından kuşatılmasıyla oluşan kuantum kuyu şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 2.5b'de ise bu yapının tekrar edilmesiyle ( $d$  genişliğinde birbirini tekrar eden GaAs kuantum kuyularının,  $b$  kalınlığındaki AlGaAs tabakalarıyla birbirinden ayrılmasıyla) oluşturulan yapı görülmektedir. Bu çeşit yapılar,  $b$  bariyer genişliğine bağlı olarak ya *çoklu kuantum kuyuları* (*multiple quantum well, MQW*) yada *süperörgü* (superlattice, SL) olarak adlandırılır. Çoklu kuantum kuyularında AlGaAs bariyer genişliği, bireysel kuantum kuyuları birbirinden yalıtılmış ve sistemin özellikleri tekli kuantum kuyularinkine aynı özelliğe sahip olacak kadar geniştir ( $>20$  nm). Bariyer genişliği  $b$ 'nin küçük değerlerinde ise ( $\leq 10$  nm), ardışık kuyular içindeki taşıyıcıların dalga fonksiyonları birbirlerini etkiler ve yapı boyunca içinde

barınabilecekleri bir enerji bandı oluşturur (minibant). Bu durum, süperörgü olarak isimlendirilir.



Şekil 2.5. GaAs/AlGaAs (a) tekli kuantum kuyusunun, (b) çoklu kuantum kuyu veya süperörgü yapının şematik diyagramı

Kuantum kuyulu yapılarda ışık soğrulması ve/veya ışık yayılımı, kuantum sınırlamadan kaynaklı oluşan elektron ve boşlukların bulunabilecekleri alt bantlar arasındaki geçişlerle olmaktadır. Sınırlamadan kaynaklı, bu altbantlar arası geçişler için uyulması gereken seçim kuralları, elektron ve boşluk dalga fonksiyonlarının arasındaki üst üste binmesiyle (overlap) belirlenir. Durum ifade eden kuantum sayılarının aynı olması, dalga fonksiyonlarının benzer olmasına ve durum geçişlerin olasılığının güçlü olmasına sebep olur. Kuantum sayıları arasındaki tek sayı farkı bulunan dalga fonksiyonları ise karşıt simetriğe sahip olacakları için geçişler daha zayıf olacaktır (Fox 2001).

#### 2.4. Kızılötesi Algılayıcılar

Kızılötesi (IR) ışınım, görünür ışık ve mikrodalga ışınımın arasında kalan, elektromanyetik spektrumun 0,75 µm (1,65 eV) - 1000 µm (1,2 meV) arasındaki dalgaboyuna sahip elektromanyetik dalgalardan oluşur. İnsan gözü görünür ışığa (0,4 - 0,7 µm) iyi tepki verirken IR ışınımına zayıf tepki vermesinden dolayı IR ışınımında kodlanan bütün bilgiler insan gözü tarafından algılanamaz. Nesnelerin, sıcaklığına bağlı olarak geniş bir kızılötesi bölgede ışınım yapması, farklı uygulamalar için bu ısı ışınımı algılamak isteğini dolayısıyla bu işi yapan bir aygıt olan ihtiyacı doğurmuştur. IR bölgenin bu geniş spektrumunu kapsamak amacıyla da çeşitli IR algılayıcılar üretilmiştir (Wilson 2000).

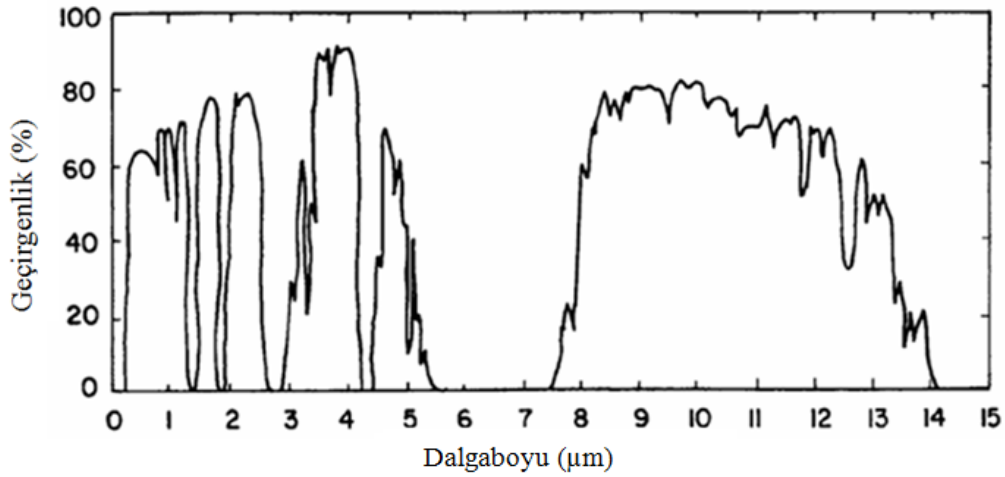
0 K mutlak sıcaklığının üzerindeki bütün cisimler elektromanyetik tayf içinde ışınım yayar. Işınımın enerjisi nesnenin yüzey durumu ve sıcaklığıyla belirlenir. Cismin sıcaklığına bağlı olarak birim alanından yaydığı yayılım miktarını siyah cisimle ilişkilendirilen Planck kanunu tanımlar;

$$I(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1} \quad (2.7)$$

Bu eşitlikte  $h$  Planck sabiti,  $c$  ışık hızı,  $\lambda$  dalgaboyu,  $T$  sıcaklık ve  $k$  Boltzman sabitini göstermektedir.

Yeryüzüne gelen güneş enerjisi atmosfer tarafından soğurulma, saçılma, dağılma ve yansıma gibi fiziksel etkilere uğrar. Atmosferik soğurulma, atmosferi

meydana getiren bileşenlerin etkin enerjilerinin soğurulması ile sonuçlanır. En etkin soğurucular su tanecikleri (H<sub>2</sub>O), karbondioksit (CO<sub>2</sub>) ve ozondur (O<sub>3</sub>). Atmosferik pencereler, atmosferin kısmi olarak geçirgen olduğu dalgaboyu genişlikleridir. Bu pencereler 3-5 µm ve 8-12 µm arasındadır. Oda sıcaklığındaki bir cismin yaydığı ışınımın çoğu 3-14 µm dalgaboyu bölgesindedir (Lloyd 1975). Şekil 4.1'de atmosferin 0,7 µm'den 15 µm'e kadar olan bölgedeki geçirgenliği gösterilmiştir (Gebbie ve ark. 1951).



Şekil 2.6. Atmosferik pencere (Gebbie ve ark. 1951)

IR görüntüleme aygıtları askeri ve sivil amaçlı birçok yerde kullanılmaktadır. Askeri uygulamalarda hedef tespiti, gözetim, gece görüşü ve izleme alanlarında kullanılmaktadır. Sivil alanda ise ısı verim oranına bağlı analizlerde, uzak sıcaklık duyarlılığı, spektroskopi, hava tahminleri ve ısı duyarlı teleskoplarla astronomide kullanılmaktadır.

Algılama genel olarak üç süreçten oluşur: Gelen ışın tarafından üretilen taşıyıcı, akım-kazanç mekanizması tarafından taşıyıcıların taşınması-çoğaltılması ve çıkış akımını oluşturmak üzere taşıyıcıların çıkarılmasıdır.

Bir algılayıcının çalışması istenilen dalgaboyunda yüksek duyarlılıkta, yüksek tepki hızında olması ve minimum gürültüde çalışması beklenir. Aynı zamanda algılayıcı uygun boyutta, düşük akım-voltaj aralığında kullanılmalı ve çalışılan bölgede güvenilir sonuçlar vermelidir (Sze ve ark. 2007).

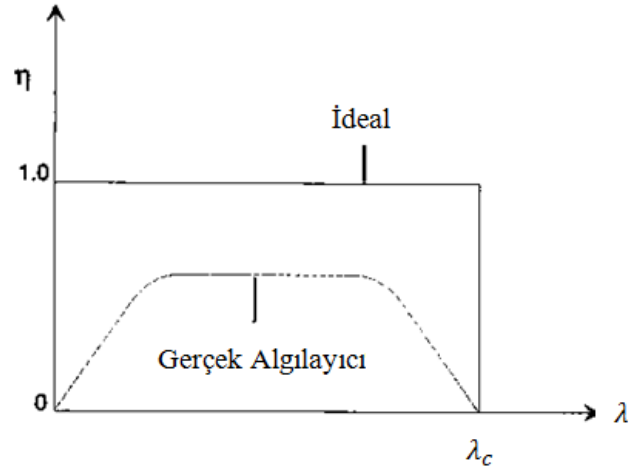
Algılayıcıların asıl amacı, üzerine düşen ışığı elektrik sinyaline dönüştürmektir. Bu durum farklı fizik olgularını kullanarak ifade edilebilir. Algılayıcılar iki ana kategoriye ayrılır: Isıl ve foton algılayıcılar. Isıl algılayıcılar, dalgaboyuna bağlı değilken, foton algılayıcılar dalgaboyuna bağlıdır.

#### 2.4.1. Foton algılayıcılar

Foton algılayıcılar gelen fotonun, maddenin doğrudan atomik örgüsüyle etkileşmesi sonucu algılandığı aygıtlardır. Işınımın maddeyle olan etkileşimi, devrede direnç, indüktans, voltaj veya akım gibi parametrelerin değişimine neden olur (Dereniak ve Boreman 1996). Bu değişim, okuma devresi tarafından elektronik düzeyde okunarak algılama gerçekleştirilmiş olur.

Fotonların algılanması sürecini anlamak için, ışığı oluşturan fotonların elektrona dönüşümünü incelemek gerekir. Bir fotonun akım olarak okunabilen elektrona dönüşüm verimliliği *kuantum verimliliği* ( $\eta$ ) olarak adlandırılır. Kuantum verimliliğinde yansıma, soğrulma, saçılma ve elektron-boşluk yeniden birleşmesi göz önüne alınmalıdır. Çünkü bu mekanizmalar, üretilen fotoelektronun yapı içindeki akıma katkı yapamadan enerjisini kaybetmesine sebep olurlar. Kuantum verimliliği, gelen her fotonun ürettiği elektronların sayısından bağımsız olarak yüzde olarak ifade edilir.

Algılayıcının optik ışınımı belirleyebileceği en uzun dalgaboyu,  $\lambda_c$  kesim dalgaboyudur. Işık algılayan bir sistemde, dalgaboyunun kuantum verimliliğine karşı grafiği ideal ve gerçek durum için Şekil 2.7'de şematik olarak gösterilmiştir (Dereniak ve Boreman 1996).



Şekil 2.7. İdeal kuantum verimliliğinin kesim dalgaboyuna bağlı grafiği (Dereniak ve Boreman 1996)

Foton algılayıcılar, algılayıcı yapılarına göre fotoiletken ve fotovoltaiik algılayıcılar olmak üzere iki gruba ayrılır. Fotoiletken ve fotovoltaiik algılayıcılar, yapıları ve kullandıkları elektriksel algılama devreleri bakımından farklılık gösterirler. Kuantum kuyu IR algılayıcılar (QWIP) genellikle fotoiletken kipte çalışırlar (Tidrow ve ark. 1999).

#### 2.4.2. Kuantum kuyu IR algılayıcılar

Yarıiletkenlerde optik altbantlar arası geçişleriyle ilgili ilk çalışmalar iki boyutlu (2D) elektron sistemleriydi. IR aygıtlar için kuantum kuyusu oluşturma fikri ilk olarak Chang L. L. ve ark.ları (1977) ile Esaki L. ve ark. (1977) tarafından önerilmiştir. IR'nin algılanması için kuantum kuyularının oluşumu ilk olarak Chui L. C. ve ark. (1983) ile Smith J. S. ve ark. (1983) tarafından deneysel olarak gösterilmiştir. Foton algılayıcıların teorisi ise Coon D.D. ve ark. (1984, 1985, 1986), Goossen K.W. ve ark. (1985, 1988) tarafından çalışılmıştır. Kuantum kuyularda altbantlar arası geçişle ilgili ilk deneyler West L.C. ve ark. (1985) tarafından yapılmıştır. Daha sonra sırasıyla güçlü alt bantlar arası soğurma ve Stark kayması Harwit A. ve ark. tarafından 1987 yılında gözlemlendi. QWIP'lerdeki büyük ilerleme Levine B.F. tarafından 1992 yılında Bell laboratuvar grubu tarafından sağlanmıştır. Günümüzde, gece görüş kameralarında

kullanılan GaAs/AlGaAs tabanlı odak düzlem dizileri (FPA) Schneider H. ve ark. (2000), Beşikçi C. ve ark. (2008) gibi birçok araştırmacı tarafından üretilmiştir.

Kuantum kuyulu yapının tasarlanmasında, ışıkla uyarılmış taşıyıcıların kuantum kuyusundan kaçışı ve fotoakım olarak iletilmesi önemli rol oynamaktadır. Bu yüzden, uygun kuantum kuyu genişliği (malzeme tabakalarının kalınlığı) ve bariyer yüksekliği (malzeme birleşme oranı), kuyulardaki katkı miktarı seçimi kuantum kuyu algılayıcının kesim dalgaboyunun orta-dalgaboylu kızılötesi (mid-wave infrared, MWIR) bölgesinden uzun-dalgaboylu kızılötesi (long-wave infrared, LWIR) bölgesine kadar uzanmasını sağlamaktadır. Bu durum QWIP'e bir esneklik sağlamaktadır.

GaAs/AlGaAs tabanlı yapıların, yaygın teknoloji MCT (mercury-cadmium-telluride, cıva-kadmiyum-telür) algılayıcılara göre üstünlüğü, malzeme kararlılığı, ısı kararlılık ve katılama kolaylığıdır. QWIP'lerde kaçak akımın oluşmasını önlemek için, yüzey yalıtımına daha az ihtiyaç duyulması aygıt üretim işlemini nispeten kolaylaştırır. Malzemenin ve altaşın dayanıklı oluşu QWIP'lerin aygıt ve FPA üretimini MCT algılayıcılara göre daha kolay kılar.

QWIP'ler genellikle fotoiletken (PC) olarak çalışır ve uyarılmış elektronların kuyunun dışında süpürülmesi için genellikle ileri yönde yaklaşık 2 V gerilim uygulanır.

QWIP'lerin bazı olumsuz yönleri de vardır: kuantum kuyusuna dik gelen ışık soğurulmaz. Gelen ışığın soğurulabilmesi için kuantum sınırlamanın olduğu doğrultuda (büyütme doğrultusu, kuantum kuyu düzlemine dik) elektrik alan bileşeninin olmasını gerekir. Bu nedenle, yüzeye dik gelen ışığın elektrik alan vektörünün yönünü değiştirebilmek için bütün QWIP'ler metalik kırılma ızgarasına (grating) veya diğer benzer yapılara sahiptirler (Tidrow ve ark. 1999). Böylece, algılayıcıların soğurma kuantum verimliliği, hem kuantum kuyularının soğurma kapasitesine hem de eşleştirme yapısının etkisine bağlıdır (Tidrow ve ark. 1999).

Algılayıcı üzerine gelen kızılötesi fotonların soğurulmasıyla uyarılan fototaşıyıcılar, kuyu düzlemi boyunca (elektrik alan kuyular boyunca, paralel geçişler) veya kuyulara dik doğrultuda (elektrik alan büyütülen tabakalara dik doğrultuda, dik geçişler) hareket ederler. Dik geçişler, paralel geçişlere göre daha

üstündür çünkü uyarılmış seviye ile temel seviye arasındaki mobilitelerin farkı, dik geçişlerde daha fazladır. Sonuç olarak, kuantum kuyulara dik geçişler yüksek fotoakım vermektedirler. Ek olarak, dik geçişlerde bariyerler, temel seviyede bulunan taşıyıcıların geçişini engellemektedir ve bu da dik geçişlerde daha düşük karanlık akımın oluşmasını sağlar. Bu sebeplerden dolayı, QWIP'ler fotonla uyarılmış taşıyıcıların kaçıışı ve dik geçişler üzerine dayanır (Gunapala ve Bandara 2000).

Alt bantlar arası geçişin diğer bir özelliği, kısa taşıyıcı yaşam süresidir. Kısa yaşam süresi aslında hızlı aygıt anlamındadır, ancak bu durum QWIP'lerin daha yüksek karanlık akımdan dolayı MCT'lere göre daha düşük sıcaklıklarda çalışmasını mecbur kılar (Tidrow ve ark. 1999).

#### **2.4.2.1. Karanlık akım**

Karanlık akımın anlaşılması QWIP'lerin tasarımı ve eniyilemesi (optimizasyonu) için önemlidir; çünkü karanlık akım, algılayıcının gürültü seviyesini ve çalışma sıcaklığını etkiler (Donchev ve ark. 2002). Dolayısıyla, karanlık akım, aygıtın kalitesini ve performansını belirleyen bir büyüklüktür. Küçük bir sinyal olan fotoakımın okunabilmesi için yapıdaki karanlık akımın düşük olması amaçlanır.

QWIP'lerde, karanlık akımda etkili olan üç mekanizma vardır. Her bir mekanizma belli bir sıcaklık bölgesinde baskın olmakla birlikte bütün sıcaklıklarda akıma katkı sağlamaktadır. Düşük sıcaklıklarda ( $T < 40$  K,  $10\mu\text{m}$  kesim dalgaboyu için) karanlık akım, doğrudan tünellemeyle (direct tunneling, DT) ilişkili kusurlar tarafından oluşur. Yüksek kaliteli malzemelerin büyütülmesi ve üretilmesiyle, bu sebeple oluşan karanlık akım azaltılabilir. Orta çalışma sıcaklık bölgesinde (40 ile 70 K arasında,  $10\mu\text{m}$  kesim dalgaboyu için), ısı destekli tünelleme (thermally assisted tunnelling, TAT) baskın mekanizmadır. Isıl enerjiyle uyarılan elektronlar, uygulanan voltaj altında bükülen bariyerlerin içindeki kusurlarla etkileşerek tünelleme yaparlar. Daha yüksek sıcaklıklarda ( $>70$  K,  $10\mu\text{m}$  kesim dalgaboyu için) ısıl olarak uyarılmış (thermionically emitted, TE) taşıyıcılar bariyerlerin üzerinden akıma sebep olur. Uygun karanlık



akımın ve fototepkinin sağlanabilmesi için aygıt yapısının, katkı yoğunluğunun ve uygulanan ileri voltajın değiştirilmesi gerekebilmektedir.

#### **2.4.2.2. BLIP sıcaklığı**

Arkaplan sınırlı kızılötesi başarımlı (background limited infrared performance, BLIP) sıcaklığını ölçmek için yapının karanlık akımı ve oda koşullarına maruz kalarak aydınlık akımı voltaja bağlı olarak yapılır. Aynı voltaj altında, aydınlık ve karanlık akım değerleri arasındaki fark, taban değerini vermektedir. BLIP sıcaklığı (tatbiki olarak), aynı voltaj altında, taban akımının yaklaşık olarak karanlık akıma eşit olduğu sıcaklıktır. BLIP sıcaklığı uygulanan voltajla ve yapının odayı görüş alanıyla (FOV) özelleştirilir. 10 µm civarındaki kesim dalgaboyuna sahip QWIP'ler üzerinde yapılan çalışmalarda BLIP sıcaklığı genellikle 60-70 K çalışma sıcaklığına sahiptir (Benisty ve ark. 1991 ve içindeki referanslar).

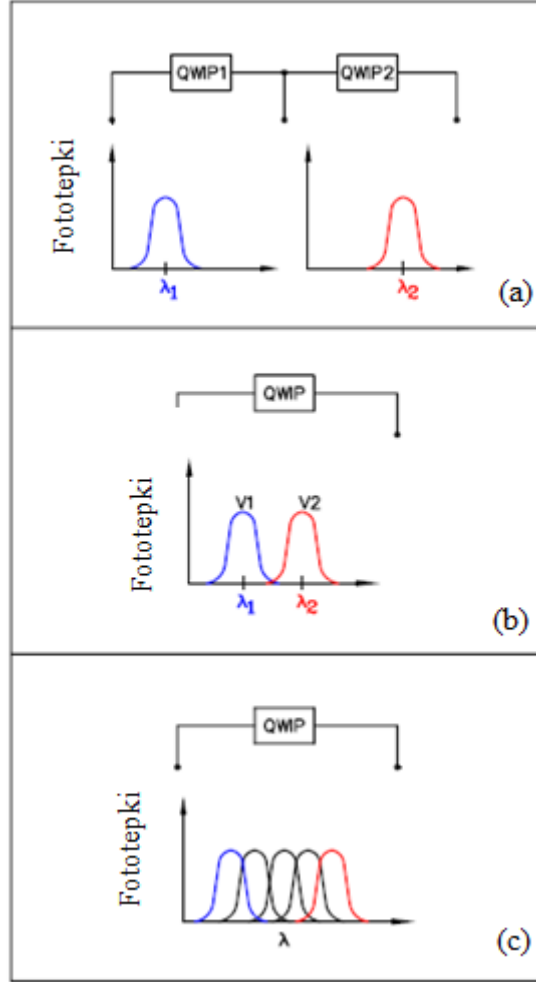
#### **2.4.2.3. Çok renkli ve çoklu tayfsal yapıya sahip algılayıcı uygulamaları**

Epitaksiyel büyütme tekniği ile büyütülen çoklu tabakalara dayanan QWIP'lerin tasarımı oldukça esneklerdir. Bu durum çok renkli (multicolor) ve çoklu tayf (multispectral) algılayıcıların oluşmasına imkân tanır. Bu yaklaşımlar üç kategoride incelenebilir.

- (1) Çoklu tabakalar
- (2) Voltaj bağlı tabakalar
- (3) Voltaj uyumlu tabakalar

Bu üç kategori Şekil 2.8'de şematik olarak gösterilmiştir. Genellikle, çok renkli ve çoklu tayf algılayıcılar voltaj gibi değişkenlerle değiştirilebilen tayfa sahip aygıtlardır. Basınç, manyetik alan, filtre pozisyonu gibi tayf tepkisini değiştirebilen diğer değişkenler mevcuttur fakat bu değişkenler pratik uygulamalarda tercih edilmez. İlk yaklaşımda (Şekil 2.8a), çoklu istifleme (multistack) ile büyütülen farklı dalgaboylarına tepki veren iki veya daha fazla tek renkli QWIP'lerin aralarda iletim tabakaları ile ayrılmasından oluşur (Liu ve Schneider 2006). Her bir QWIP bağımsızdır. Bu yaklaşımın üstünlüğü tasarımının

basit oluşu ve renkler arası elektriksel kesişimin (electrical crosstalk) ihmal edilebilir oluşudur. Olumsuzluğu ise aradaki kontak tabakada ortaya çıkan üretim zorluğudur.

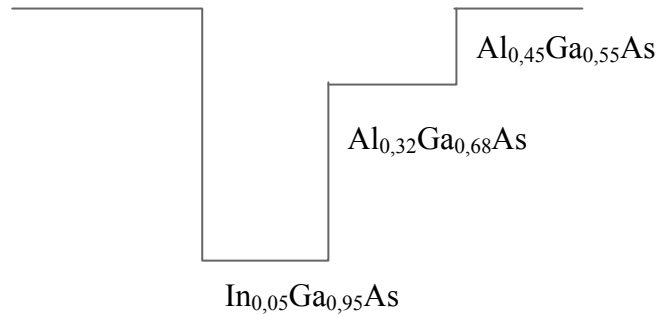


**Şekil 2.8.** Üç farklı çok renkli QWIP yaklaşımı. (a) Çoklu istiflenme ile büyütülen iki farklı dalgaboyu tepkisine sahip QWIP'ler (b)  $V_1$  voltajında  $\lambda_1$  dalgaboyu ve  $V_2$  voltajında  $\lambda_2$  dalgaboyu tepkisine sahip QWIP (c) Uygulanan voltaj değeriyle değiştirilebilen sürekli bir tepkiye sahip olan QWIP (Liu ve Schneider 2006)

İkinci yaklaşımda (Şekil 2.8b), voltajla ayarlanabilir fototepekiye sahip QWIP yapıları vardır. Bu QWIP yapısında,  $V_1$  voltajında  $\lambda_1$  ve  $V_2$  voltajında  $\lambda_2$  dalgaboyuna sahip tepeler mevcuttur. Böyle bir QWIP, ince iletim tabakaları tarafından ayrılan tek renkli QWIP'lerin birleştirilmesi ile gerçekleşir (Liu ve ark. 1993; Lenchyshyn ve ark. 1996). Tüm tabakalara voltaj uygulandığında, her bir

tek renkli QWIP'in sahip olduğu dirençler doğrultusunda voltaj paylaşılır. Uygulanan voltaj, sıfırdan itibaren arttırılmaya başlandığında, voltajın çoğu direnci çok olan tek renkli QWIP üzerine düşecektir. Tek renkli QWIP'in tayftaki algılayıcı tepkisi, uygulanan voltajla aşamalı olarak değiştiği için, çok renkli QWIP'lerde tayfsal tepki uygulanan voltajla tayfta geniş bir kısmı kapsamaktadır. Bu yaklaşımın üstünlüğü, aygıt üretim aşamasının birinci yaklaşımdaki aygıt üretim aşamasına göre daha kolay olmasıdır. İkinci yaklaşımda sadece iki bağlantı ucu yeterli olmaktadır. Olumsuzluğu ise, renkler arasındaki elektriksel kesişimi engellemenin zorluğudur.

Uygulanan farklı voltajın fonksiyonu olarak foto-tepki tayfinin değişimi Martinet ve ark. (1992) tarafından araştırılmıştır (Şekil 2.8c). Bu yapı, sürekli bir tayf sağlamaktadır. 8,5  $\mu\text{m}$  ile 13,5  $\mu\text{m}$  arasındaki bölge, basamaklı kuyuların Martinet ve ark. (1992) tarafından kullanılmasıyla ulaşılmıştır. Şekil 2.9 aşamalı kuantum kuyuların bant kenar profilini göstermektedir. Bütün voltaj değerleri için, iyi bir QWIP performansını garantilemek zordur. İyi bir performansa ulaşmak için, son seviye geçişleri (genellikle ilk uyarılma seviyesi) bariyerin tepesine yakın olmalıdır bunun sebebi ise büyük alt bantlar arası geçiş gücünü sağlamak ve aynı zamanda uyarılmış taşıyıcılar için kolay kaçış sağlamaktır. Bütün voltaj değerleri için bu iki durumu sağlamak oldukça zordur. Diğer etken ise, aşamalı kuyuların genişliği QWIP performansını etkilemektedir (Liu ve Schneider 2006).



**Şekil 2.9.** Voltaj bağlı spektruma sahip QWIP'lerde kullanılan aşamalı kuantum kuyu bant kenar profili (Liu ve Schneider 2006)

## 2.5. Lüminesans

Uyarılmış bir atom veya molekül kararsızdır; fazla enerjisini vererek taban hale dönmek ister. Atom veya molekül taban enerji düzeyine dönerken fazla enerjisinin tümünü veya bir kısmını ışık yayarak verir. Bu ışık yayılması olayına genel olarak *lüminesans* denir. Uyarma yollarına göre lüminesans değişik gruplara ayrılır:

- 1- Uyarılma enerjisi akım yoluyla sağlanırsa, bunun sonucu gözlenen lüminesans olayına *elektrolüminesans (EL)* adı verilir.
- 2- Uyarılma enerjisi fotonların soğrulmasıyla sağlanırsa, gözlenen ışık yayılımına *fotolüminesans (PL)* denir.
- 3- Uyarma elektron demetiyle bombardıman sonucu oluşuyorsa gözlenen lüminesansa *katodolüminesans (CL)* denir.

Yarıiletken malzemeler içinde uyarılma yönteminden bağımsız olarak, oluşturulan elektron-boşluk çiftinin yeniden birleşmesi ve böylece algılanacak fotonun üretilmesi gerekmektedir.

### 2.5.1. Yeniden birleşme mekanizmaları

Yarıiletkenlerde ışınım yayılımı yeniden birleşme mekanizmaları üç farklı şekilde gerçekleşir. Bunlar sırasıyla,

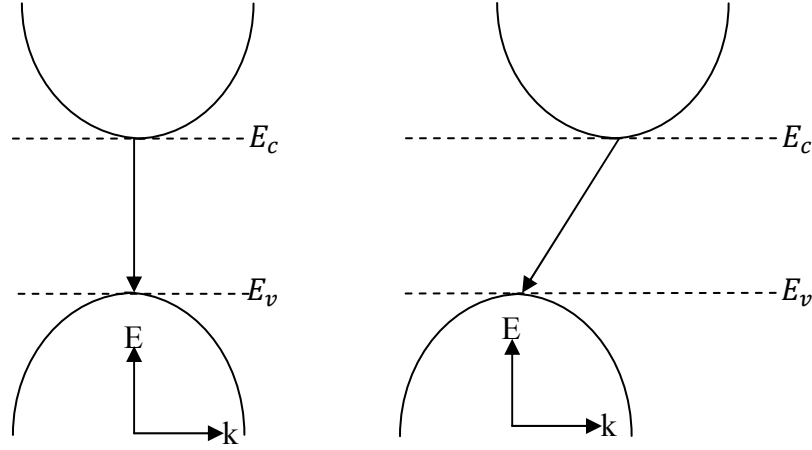
- (1) bantlar arası geçişler,
- (2) safsızlık merkezleri yoluyla yeniden birleşme,
- (3) ekziton yeniden birleşme

mekanizmalarıdır.

#### 2.5.1.1. Bantlar arası geçişler

Bantlar arası geçişler, iletim bandının alt seviyesi ve değerlik bandının üst seviyesi arasında gerçekleşen geçişlerdir. Şekil 2.10a ve b sırasıyla doğrudan ve dolaylı bant aralıklı maddeler için yeniden birleşme mekanizmalarını göstermektedir. Bantlar arası ve diğer tüm geçişlerde sistemin toplam dalga

vektörü korunmak zorundadır. Foton dalga vektörü  $2\pi/\lambda$  ile verilir;  $a$  kristal örgü mesafesini göstermek üzere ifade edilen elektron dalga vektörü  $-\pi/a$  ile  $+\pi/a$  arasındadır. Foton dalga vektörü, elektron dalga vektörlerinden oldukça küçüktür. Sonuç olarak eğer işe giren sadece elektron ve foton ise, elektron hemen hemen aynı dalga vektörüne sahip durumlar arasında bir geçiş yapar.



**Şekil 2.10.** (a) Doğrudan bant aralığına sahip yarıiletken için ve (b) Dolaylı bant aralığına sahip yarıiletken için bantlar arası geçişler (Wilson 2000)

Doğrudan bant aralıklı yarıiletkenlerin  $E-k$  diyagramında dikine geçişler izinlidir. Dolaylı bant aralıklı yarıiletkenlerde dalga vektörünü korumak için bir fonon oluşturulmalı veya yok edilmelidir. Yayınlanan fotonun dalgaboyu için

$$\frac{hc}{\lambda} = E_g \pm E_p \quad (2.8)$$

ifadesi geçerlidir. Burada  $E_p$  fononun enerjisi, + ve – işaretleri fonon üretimi ve yok edilmesi durumuna karşılık gelmektedir. Dolaylı geçiş işlemi ikiden çok parçacık içerdiğinden geçiş daha düşük ihtimaldir. Bantlar arası yeniden birleşme ihtimali,

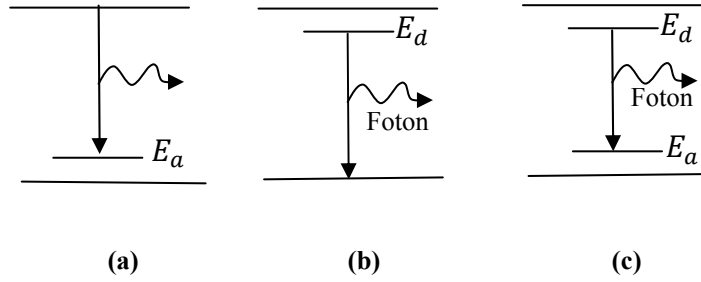
$$r = B n p \quad (2.9)$$

olarak yazılır.  $B$  yeniden birleşme sabiti,  $n$  ve  $p$  sırasıyla elektron ve boşlukların bantlardaki toplam sayısıdır. GaAs için  $B$  değeri  $7,21 \times 10^{-16} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 'dir (Varshni 1967b).

$B$ 'nin büyüklüğü dolaylı bant aralığına sahip yarıiletkenler için doğrudan bant aralığına sahip yarıiletkenlerden  $10^6$  kat daha küçüktür. Doğrudan bant aralığına sahip yarıiletkenlerde yeniden birleşme mekanizması ile elde edilen radyasyonun bir olumsuz yanı, radyasyonun yarıiletken maddenin uzun bir mesafesinde yol alması gerekliliği durumunda, yayılan radyasyonun yeniden soğurulması ihtimalidir (Wilson 2000).

### 2.5.1.2. Safsızlık merkezi yeniden birleşmesi

Safsızlık enerji seviyelerini içeren yeniden birleşme mekanizmasının üç farklı tipi Şekil 2.11'de gösterilmektedir. Şekil 2.11a'da iletkenlik bandı-alıcı seviyesi geçişleri, Şekil 2.11b'de verici seviyesi-değerlik bandı geçişleri ve Şekil 2.11c'de verici-alıcı geçiş durumları gösterilmektedir.



**Şekil 2.11.** (a) Elektronun iletkenlik bandından boş alıcı (acceptor) seviyelerine inmesi, (b) verici (donor) seviyesindeki bir elektron değerlik bandındaki bir boşlukla yeniden birleşmesi ve (c) verici seviyesindeki elektronun boş alıcı seviyesine düşmesi (Wilson 2000)

### 2.5.1.3. Ekziton yeniden birleşmesi

Ekziton, birbirine Coulomb kuvvetinin etkisiyle çekilen elektron ve boşluğun oluşturduğu bağlı durumdur. Elektriksel olarak toplam yükün sıfır olması, yapı içinde yük taşınması olmadan enerji iletiminin olmasını sağlar. Yarıiletken malzemeye gelen foton, değerlik bandından iletkenlik bandına elektronu uyardığında geriye kalan boşluk, elektron tarafından çekilir. Dolayısıyla sahip olduğu enerji, elektron-boşluk çiftinin özgür (bağımsız) durumuna kıyasla biraz daha küçüktür. Ekziton halleri iletkenlik bandı dibinin hemen altında yerleşir. Ekziton bağ enerjisini ( $E_e$ ),

$$E_e = 13,6 \frac{m_r^*}{m_e} \left( \frac{1}{\epsilon_r} \right)^2 \text{ eV} \quad (2.10)$$

olarak yazabilir. Burada  $m_r^*$  indirgenmiş kütedir. GaAs için  $\epsilon_r = 11,5$ ,  $m_e^* = 0,068m$ ,  $m_h^* = 0,47m$ ,  $m_r^* = 0,06m$  olduğundan  $E_e = 5,9$  meV bulunur. Literatürde gözlenen deneysel değerler, bu basit model hesaplamasıyla uygunluk gösterir. Üç boyutlu külçe GaAs için ekziton bağ enerjisi 4,8 meV olarak bulunmuştur (Wilson 2000). Kuantum kuyulardaki sınırlama arttıkça, ekziton bağlanma enerjisi de artmaktadır; kuyu genişliğinin neredeyse sıfır olduğu sınır koşulunda bu enerji külçe durumdaki enerjinin dört katına çıkmaktadır.

Ekziton enerjileri safsızlıkların varlığından etkilendiklerinden bazı durumlarda bir ekziton komşu safsızlığa 'bağlı' kalabilmesine rağmen, örgü boyunca hareket edebilir. Eğer safsızlıklar doğal alıcı ve verici iseler, bu durumda ekziton bağ enerjisi, bağlı oldukları merkezin enerjisinin 1/10'u kadardır. Bağlı ekzitonların, elektron-boşluk yeniden birleşmesi dolaylı yarıiletkenlerde dalga vektörünü korumak için fonon soğurulmasına ihtiyaç olmaksızın bu haller yoluyla gerçekleşebilirler (Wilson 2000).

### 2.5.2. Fotolüminesans spektroskopisi

PL, optik uyarım altındaki bir malzemeden kendiliğinden yayılan ışınımdır. Bu ışınım toplanabilir ve analizi yapılarak numuneler hakkında bilgi edinilebilir. PL spektroskopisi uygulamaları;

- Bant aralığının belirlenmesi: Yeni bileşik yarıiletkenlerle çalışırken bant aralığının belirlenmesi önemlidir.
- Safsızlık seviyesi ve kusurların belirlenmesi: Yarıiletken içinde ışınımlı geçişler, kusur seviyelerini içerir. Bu seviyelerle ilişkili olan PL enerjisi, kusurların adlandırılmasında ve PL'in şiddeti kusurların miktarını belirlemede kullanılır.
- Yeniden birleşme mekanizması: Denge durumuna gelme “*yeniden birleşme*” olarak bilinir. Bu durum ışımlı ve ışısız süreçleri içerir. Fotonla uyarımın seviyelerine ve sıcaklığa bağlı olan PL şiddeti, baskın olarak yeniden birleşme mekanizmalarına bağlıdır.
- Malzeme kalitesi: Genellikle ışısız süreçler, yerleşmiş kusur seviyelerine ilişkilidir ki bu kusurların varlığı, numunenin kalitesini ve aygıtın performansını etkilemektedir. Böylece malzeme kalitesi, ışınımlı yeniden birleşmenin miktarı ile belirlenir.

PL örneğe zarar vermeyen bir tekniktir. Örnek optik olarak uyarıldığı için, elektriksel bağlantılar gerektirmez ve yapısal kararlılığı olan yapılar için pratikte hiçbir zorluk ortaya çıkmaz. PL analizlerinin temel sınırlayıcısı numunenin yaptığı ışımaya miktarıdır.

PL tayfları, elektronik enerji seviyelerinin belirlenmesinde kullanılan geçiş enerjilerini gösterir. Sıcaklık ve voltaj gibi dış değişkenlerle PL şiddetinin değişimi elektronik seviyeler ve bantlar hakkında daha fazla bilgi edinilmesini sağlar.

Kuantum kuyuların PL tayfının diğer bir özelliği ise sinyalin yarı yüksekliğindeki genişliğidir. Bu kuantum kuyularının ara-yüzeyi için önemli bir bilgi sağlar: Atomik tabaka kadar küçük olan dalgalanmalar taşıyıcıların sınırlayıcı enerjisini epeyce değiştirebilir.



Kusurlar ve safsızlıklar örgünün periyodikliğini bozar ve bant yapısının yakınlarında bozukluklara sebebiyet verir. Bu bozukluklar enerji bant aralığı içindeki ayrık enerji seviyeleri olarak ortaya çıkar. Kusur ve safsızlıklara bağlı olarak, bu seviyeler kristaldeki fazla elektronların vericisi veya alıcısı olarak davranır. Safsızlık çekirdeği veya kusuru nedeniyle, elektron ve boşluklar yerel yüklerin yokluğu ya da fazlalığı nedeniyle çekilirler ve bu çekilme sonucu Coulomb kuvveti oluşur. Bu durum Hidrojen sistemine modellenabilir ve bağlanma enerjisi malzemenin dielektrik sabiti tarafından azaltılabilir. Elektronlar ve boşluklar farklı etkin kütle değerine sahip olduğu için verici ve alıcılarda farklı bağlanma enerjilerine sahip olacaklardır.

Sıcaklık yeterince düşük olduğunda, taşıyıcılar bu seviyelerde tuzaklanacaktır. Eğer bu taşıyıcılar ışınlı olarak birleşirlerse, yayılan ışının enerjisi kusur ve safsızlık seviyelerinin enerjilerini belirlemek için analiz edilebilir. Sığ seviyeler, iletkenlik ve değerlik bandı kenarına yakın seviyeler, muhtemelen ışınlı sürece katkıda bulunacaklardır fakat örnek sıcaklığı tuzakların dışındaki taşıyıcıların ısıl aktivasyonunun önüne geçmek için düşük olmalıdır.

Derin seviyeler ise ışınlı süreçleri kolaylaştırma eğilimindedir. Bu seviyeler elektronun, fonon yayılımı ile iletkenlik ve değerlik bandı arasında ek bir geçiş yaparak, boşlukla ışınlı olarak birleşmesine olanak tanır (Gfroerer 2000).

#### **2.5.2.1. Fotoluminesansın sıcaklığa bağlılığı**

PL ölçümlerinde sıcaklık, öncelikle uygun seviyelerin ısıl geçişini belirlemek için kullanılır. PL ölçümlerinde, sıvı helyum sıcaklığında gözlemlenen tepelerin ayrışmasıyla daha iyi çözünürlük elde edilmesine rağmen, oda sıcaklığı ölçümleri de birçok amaç için yeterlidir. Düşük sıcaklıklarda, PL en düşük enerji seviyelerinde baskındır. Enerjileri küçük olduğundan ekziton ve sığ safsızlık seviyeleri genellikle düşük sıcaklıklarda görülür. Isıl enerjiye karşılık gelen sıcaklık arttıkça, ekzitonlar birbirinden ayrılır ve taşıyıcılar sığ tuzak seviyelerini terk eder. Böylece PL tepesinin şiddeti azalır.

PL ölçümlerinde sıcaklık azaldıkça, seviye geçişlerine karşılık gelen tepelerin enerji değerleri yüksek enerjilere kayar ve lüminesans şiddetinin değeri artar.

Bir tepenin yarı yükseklikte tam genişlik (full width at half maximum, FWHM) değeri, tabakaların arasındaki geçiş mekanizmalarının analizinde önemli rol oynamaktadır. Düşük sıcaklıklarda, boşlukların ve elektronların ısı enerjilerinin az olması nedeniyle daha tanımlı enerji seviyelerinde bulunurlar. Dolayısıyla, yeniden birleşme sonucu ortaya çıkan sinyal için FWHM daha küçüktür. Genellikle FWHM, sıcaklıkla doğrusal olarak artmaktadır (Thirumavalavan ve ark. 2008).

### **2.5.2.2 Yarıiletkenlerde fotolüminesansın uyarım şiddetine ve enerjisine bağlılığı**

PL ölçümünde uyarım kaynağının seçimi kritiktir. Uyarım için kullanılan kaynağın enerjisi (dalga boyu) ve şiddeti, PL sinyalini önemli ölçüde etkileyecektir. PL spektroskopisinde halojen, zenon, cıva buharlı, tungsten lambalar kullanılabilir. Bununla birlikte, çeşitli lazerler PL ölçümleri için mükemmel ışık kaynaklarıdır. Lamba ışığı, düzensiz her tarafa farklı dalga boylu ışın saçarken, lazerler monokromatik ve doğrusal ışık kaynaklarıdır. Lazer ışınının yoğunluğu yüksek, tek renkli ve uzak hedefe kayıpsız yönlendirilebilmesi PL ölçümlerinde tercih sebebidir (Sharma ve Schulman 1999).

Uyarım kaynağının şiddeti fotonla uyarılan elektron ve boşlukların yoğunluğunu kontrol eder. Her bir elektron-boşluk yeniden birleşmesi taşıyıcı yoğunluğuna bağlı olan farklı bir işleve sahiptir. Örneğin, ara-yüzey ve safsızlık seviyelerinin sayısı sonlu bir değere sahiptir ve bu seviyelerdeki yeniden birleşmeler yüksek uyarım şiddetlerinde doyumluğa ulaşır. Buna ilaveten, fotonla uyarılan taşıyıcılar ara-yüzey seviyelerindeki dağılımı değiştirebilirler. Bu yüzden, uyarım şiddeti hassas bir şekilde ölçümlenmeli ve kontrol edilmelidir (Gfroerer 2000).

Çoğu malzemenin gelen ışını soğurması, uyarım kaynağının enerjisine bağlı olduğu için gelen ışının malzeme içinde nüfuz etme derinliği uyarım

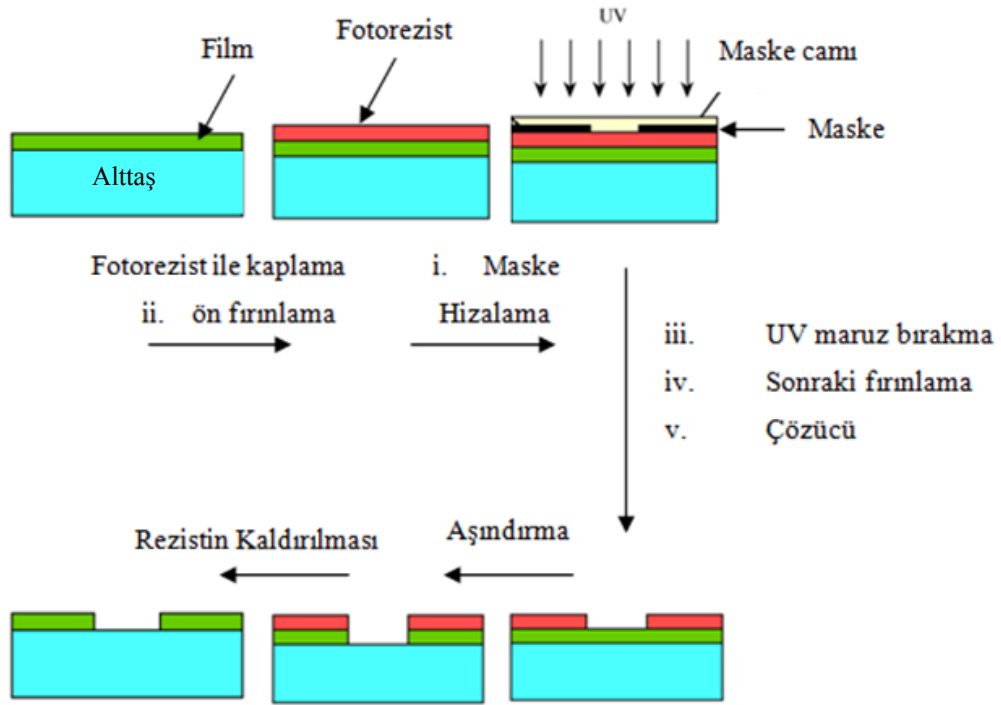
kaynağının enerjisine bağlı olacaktır. Bu, farklı uyarım enerjileriyle numunenin farklı bölgelerinde çalışmasını sağlamaktadır (Gfroerer 2000).

## 2.6. Çıplak Örneklerin Aygıt Haline Getirilmesi

Farklı yöntemlerle uygulama amacına yönelik olarak büyütülen yapıların, elektrik ve optik özelliklerinin incelenmesi, aygıt başarımının ölçülebilmesi için çıplak yapıların aygıt haline getirilmesi gerekmektedir. Aşağıda test aygıtlarının yapımı için üretim aşamalarından kısaca bahsedilmektedir.

**Maske ve Fotolitografi:** Her bir yonga üzerindeki gerçek devre maske ve fotolitografi kullanılarak oluşturulabilir. Maske, bir devre elemanın veya devrenin bir kısmının desensel olarak temsil edilmesidir. İlk önce fotorezist olarak adlandırılan ışığa hassas bir tabaka yarıiletkenin yüzeyi üzerine yayılır. Fotorezist, ultraviyole ışık uygulandığında kimyasal değişimlerin meydana geldiği organik bir polimerdir.

Şekil 2.12’de gösterildiği gibi fotorezist, maskeden geçen ultraviyole ışığa maruz bırakılır ve sonrasında malzeme, bir kimyasal çözeltiye daldırılır. Çözücü (developer) olarak adlandırılan bu kimyasal çözelti içinde, örnek üzerinde olması istenen deseni oluşturmak için fotorezistin istenmeyen kısımları uzaklaştırılır. Maske ve fotolitografi işlemi, küçük bir devrenin nasıl yapılacağını belirleyen kritik bir işlemdir. Fotorezistte desen oluşturmak için ultraviyole ışık kullanıldığı gibi, elektron ve X-ışınları da kullanılabilir.



Şekil 2.12. Fotolitografi aşamaları

**Aşındırma (Etching):** Fotorezist şablonunu oluşturulduktan ve istenmeyen kısımlar kaldırıldıktan sonra, malzeme açılan pencerelerden aşındırma işleminin yapılabilmesi için asit veya baz karışımına daldırılır. Bu aşamada kullanılan karışım, uygulama amacına, malzemenin cinsine, aşındırılmak istenen miktara bağlı olarak farklı seçilebilir.

**Metalizasyon Paketleme, Tel Bağlama:** Yukarıda bahsedilen işlemler yardımıyla devre elemanı üretildikten sonra, tüm devreyi şekillendirmek için devre elemanlarının birbirine bağlanması gereği duyulur. Metal filmler genellikle buhar depolama (vapour deposition) yöntemi kullanılarak oluşturulur ve gerçek depolama işlemi, fotolitografi ve aşındırma kullanılarak yapılır. Paketleme yapıldıktan sonra ölçüm alabilmek için bağlantılar oluşturulur (Neamen 2007).

### 3. DENEYSEL TEKNİKLER VE ÖRNEK YAPISI

#### 3.1. Epitaksiyel Büyütme

Yarıiletken malzeme büyütme tekniklerinden biri de MBE tekniğidir. Eğer epitaksiyel tabaka aynı taban malzeme üzerine büyütülüyorsa, bu işlem *aynı tip epitaksi* olarak adlandırılır. Farklı tür epitaksi işleminde, taban malzeme ve epitaksiyel malzeme farklı olmasına rağmen tek-kristal epitaksiyel katman büyütme mümkün olmaktadır. Bununla birlikte, böyle bir büyütmenin yapılabilmesi için iki kristal yapının örgü sabitlerinin birbirine yakın olması gerekmektedir. GaAs taban üzerine GaAs/AlGaAs QW yapıların epitaksiyel olarak büyütülmesi farklı tür epitaksi işlemine bir örnektir.

MBE yönteminde, büyütme haznesindeki taban basınç  $5 \times 10^{-11}$  Torr değerlerine düşebilmektedir. Büyütme işlemi sırasında bile taban basınç değeri  $2 \times 10^{-5}$  Torr değerinin üzerine çıkmamaktadır. MBE büyütme hazneleri yatay, dikey veya açılı olarak yerleştirilebilmektedir (Singh 1995). Anadolu Üniversitesi, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda kurulu Veeco Gen20MC MBE sistemi, dikey hazneye sahip bir sistemdir (Şekil 2.1). Dikey olarak konumlanan MBE haznesinin altında büyütülecek malzemelerin konulduğu efüzyon hücreleri yer almaktadır. Yüksek saflıkta element içeren hazne (crucible) efüzyon hücresine yerleştirilir. Hücre içindeki bu elementler, kristal büyütürken, kristalin bileşenlerini oluşturabileceği gibi katkı malzemesi olarak da kullanılabilir. Bir hücre ısıtıldığında, atom veya moleküller, ısıtılmış taban malzeme yüzeyine buharlaştırılır. Bu teknikte, çok karmaşık katkılama profilleri bile tam olarak kontrol edilebilir. Büyütme oranları genellikle 1 tek-atom katmanı/saniye (1 monolayer/s, 1ML/s) olarak seçilmektedir ki bu değer bu yöntemin hassasiyetini de ortaya koymaktadır.

### 3.2.Örnek Yapısı

Tasarlanan geniş bantlı Yapı 1, 2 ve 3 örnekleri için, yapıyı oluşturan tabakalar, kuyulardaki katkı miktarları ve bariyerdeki Al konsantrasyonları aşağıda verilmiştir. Tasarlanan ve büyütülen yapıların TEM karakterizasyonu Karakulak T. (2010) tarafından bakılmış, tabakaların tasarlanan şekilde büyütüldüğünden emin olunmuştur. Şekil 3.1-3.3, Yapı 1, 2 ve 3'ün şematik iletkenlik bantlarını göstermektedir.

#### Tasarlanan Yapı 1:

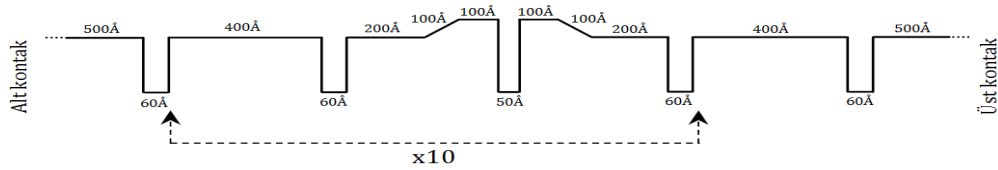
4000 Å n+ GaAs Si:  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$   
500 Å AlGaAs x=0,20  
60 Å GaAs merkezde 15 Å Si katkılı  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$   
400 Å AlGaAs x=0,20

10 tekrar:

60 Å GaAs merkezde 15 Å Si katkılı  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$   
200 Å AlGaAs x=0,20  
100 Å değişken AlGaAs x=0,25'den 0,20'e  
100 Å AlGaAs x=0,25  
50 Å GaAs merkezde 40 Å Si katkılı  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$   
100 Å AlGaAs x=0,25  
100 Å değişken AlGaAs x=0,20'den 0,25'e  
200 Å AlGaAs x=0,20  
60 Å GaAs merkezde 15 Å Si katkılı  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$   
400 Å AlGaAs x=0,20

60 Å GaAs merkezde 15 Å Si katkılı  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$   
500 Å AlGaAs x=0,20

7000 Å n+ GaAs Si:  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$   
1000 Å GaAs tampon  
GaAs SI taban



Şekil 3.1. Yapı 1'in iletkenlik bantı, şematik gösterimi

### Tasarlanan Yapı 2:

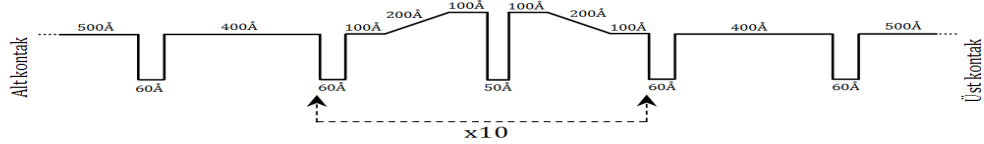
4000 Å n+ GaAs Si:  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$   
500 Å AlGaAs  $x=0,20$   
60 Å GaAs merkezde 15 Å Si katkı:  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$   
400 Å AlGaAs  $x=0,20$   
60 Å GaAs merkezde 15 Å Si katkı:  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

10 tekrar:

100 Å AlGaAs  $x=0,20$   
200 Å değişken AlGaAs:  $x=0,25$ 'den  $0,20$ 'ye  
100 Å AlGaAs  $x=0,25$   
50 Å GaAs merkezde 25 Å Si katkı:  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$   
100 Å AlGaAs  $x=0,25$   
200 Å değişken AlGaAs:  $x=0,20$ 'den  $0,25$ 'ye  
100 Å AlGaAs  $x=0,20$   
60 Å GaAs merkezde 15 Å Si katkı:  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

400 Å AlGaAs  $x=0,20$   
60 Å GaAs merkezde 15 Å Si katkı:  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$   
500 Å AlGaAs  $x=0,20$

7000 Å n+ GaAs Si:  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$   
1000 Å GaAs tampon  
GaAs SI taban



Şekil 3.2. Yapı 2'nin iletkenlik bandı, şematik gösterimi

### Tasarlanan Yapı 3:

4000 Å n+ GaAs Si:  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$   
500 Å AlGaAs  $x=0,16$   
70 Å GaAs merkezde 15 Å Si katkı  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$   
400 Å AlGaAs  $x=0,16$   
70 Å GaAs merkezde 15 Å Si katkı  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

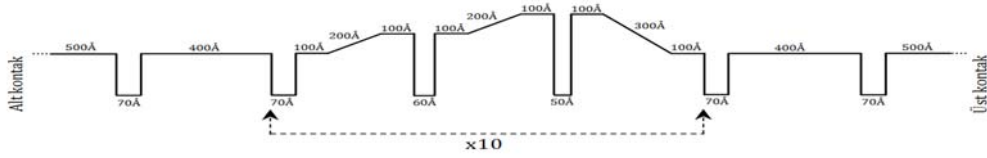
10 tekrar:

100 Å AlGaAs  $x=0,16$   
300 Å değişken AlGaAs  $x=0,25$ 'den  $0,16$ 'e  
100 Å AlGaAs  $x=0,25$   
50 Å GaAs merkezde 40 Å Si katkı  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

100 Å AlGaAs  $x=0,25$   
 200 Å değişken AlGaAs  $x=0,20$ 'den  $0,25$ 'e  
 100 Å AlGaAs  $x=0,20$   
 60 Å GaAs merkezde 25 Å Si katkılı  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$   
 100 Å AlGaAs  $x=0,20$   
 200 Å değişken AlGaAs  $x=0,16$ 'den  $0,20$ 'e  
 100 Å AlGaAs  $x=0,16$   
 70 Å GaAs merkezde 15 Å Si katkılı  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

400 Å AlGaAs  $x=0,16$   
 70 Å GaAs merkezde 15 Å Si katkılı  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$   
 500 Å AlGaAs  $x=0,16$

7000 Å n+ GaAs Si:  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$   
 1000 Å GaAs tampon  
 GaAs SI alttaş

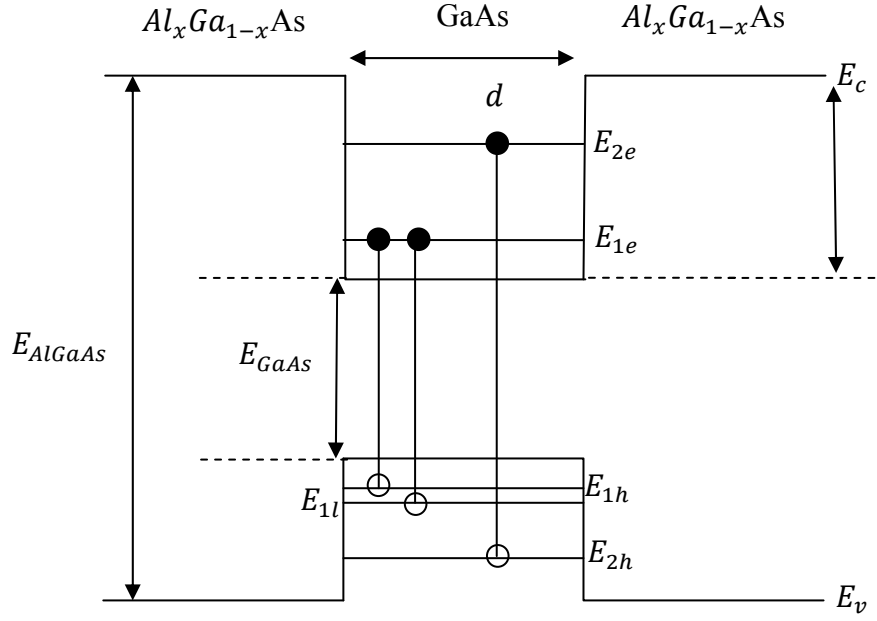


Şekil 3.3. Yapı 3'ün iletkenlik bandı, şematik gösterimi

### 3.3. Enerji Seviyeleri

Yapı 1, 2 ve 3'de bulunan kuantum kuyularının enerji seviyeleri modeli Şekil 3.4'de verilmektedir. Çizelge 3.1, Yapı 1, 2 ve 3'e ait kuantum kuyularının 4 K'deki ekziton bağlanma enerjileri (10 meV) dâhil edilmiş enerji seviye değerlerini göstermektedir. Çizelge 3.2, Yapı 1, 2 ve 3 örneklerinde bulunan bariyerlere karşılık gelen AlGaAs katmanların, 4 K'deki konsantrasyona bağlı bant aralıklarını göstermektedir.





Şekil 3.4.  $d$  kuyu genişliğindeki GaAs ve  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  bariyerine sahip olan kuantum kuyusunda enerji düzeyleri ve bantlar arası geçiş modeli

Çizelge 3.1. Yapı 1, 2 ve 3'de bulunan 50-60-70 Å genişliğindeki kuantum kuyularının enerji seviyeleri

Kuyu Genişlikleri (Å)	$E_{1e}$ (meV)	$E_{2e}$ (meV)	$E_c$ (meV)	$E_{1h}$ (meV)	$E_{2h}$ (meV)	$E_{1l}$ (meV)
50	72,4	226,9	231,2	20,4	77,6	54,8
60	54,4	175,5	183,6	14,8	56,8	41,4
70	42	137,3	145,9	11,2	12,9	32,1

Çizelge 3.2. Yapı 1, 2 ve 3'de bulunan AlGaAs bariyerlerinin konsantrasyona bağlı bant aralığı enerjileri

Bariyer Yüksekliği	
$x$ (konsantrasyon oranı)	$E_{\text{AlGaAs}}$ (meV)
0,16	1744,9
0,20	1801,6
0,25	1874,9

### 3.4. Aygıt Üretimi: GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As Örneklerinin Aygıt Haline Getirilmesi

Bu kısımda, MBE’de büyütülmüş GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As QW yapılarının cihaz haline getirilme sürecinden kısaca bahsedilecektir. Yapı 1, 2 ve 3 örnekleri 1×1cm<sup>2</sup> boyutlarında kesilip cihaz haline getirilmek için aşağıdaki basamaklardan geçirildi (Arpapay 2010).

**Fotolitografi;** Örneklerin yüzeyleri, döner kaplayıcıda (spin coater) 40 sn, 5000 rpm devirle çevrilerek fotorezistle kaplandı. Fotorezistin örneğe daha iyi tutunabilmesi için 1 dk 110 °C’de ön fırınlama yapıldı.

Fotorezist kaplı örnekler, maske hizalayıcıda (mask aligner) 60 sn boyunca maskeden geçen ultraviyole ışığa maruz bırakıldı. Örnek üzerinde uygun deseni oluşturmak için 10 ml çözücü (AZ400K) ve 40 ml saf su (deionized) karışımı içerisinde 30 sn bekletildi. Sonraki aşındırma işlemi sırasında fotorezistin asitlere karşı dayanıklılığını arttırmak için 120 °C’de 5 dk fırınladı.

**Aşındırma (Etching);** Aşındırma işlemi, ıslak aşındırma yöntemiyle yapılmıştır. Aşındırma çözeltisi olarak 200 ml saf su, 2,5 ml H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 20 ml H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> karışımı kullanıldı. Aşındırma çözeltisinde örnekler sırasıyla 5 dk, 3 dk 25 sn ve 5 dk 30 sn bekletildi. Yapı 1, 2 ve 3 örnekleri için fotorezistle birlikte yükseklikler sırasıyla 3,7 µm, 3,2 µm ve 3,8 µm iken, aşındırma sonrası fotorezist kaldırıldıktan sonraki yükseklikler 2,2 µm, 1,8 µm ve 2,3 µm değerlerine düşmüştür. Buraya kadar yapılan işlemler örnek üzerinde masatepe (mesa) oluşturmak içindi.

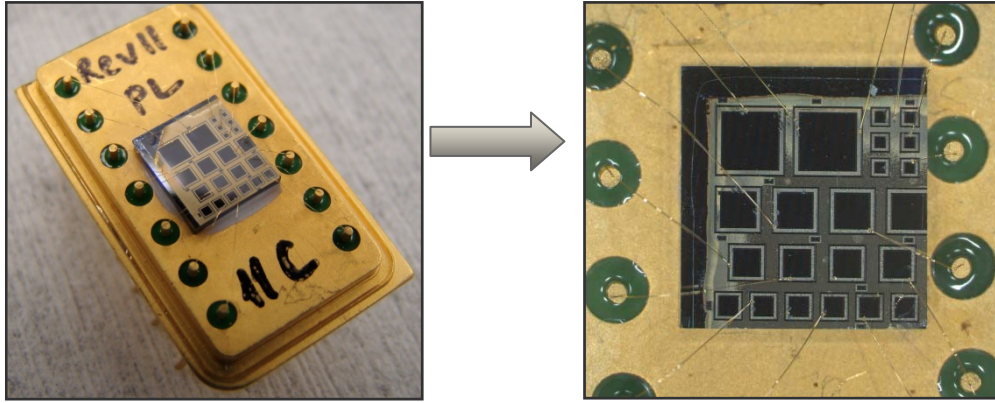
**Metalizasyon, Paketleme ve Tel Bağlama;** Aygıtların elektrik bağlantılarının yapılabilmesi için ihtiyaç duyulan omik kontaklar, yeni bir fotolitografi aşamasıyla gerçekleştirildi. Masatepe tanımlamaları yapılmış örneklerin yüzeyleri döner kaplayıcıda 40 sn, 5000 rpm devirle fotorezist kaplandı. 110 °C, 1 dk ön fırınlamadan sonra maske hizalayıcıda 60 sn UV ışınına maruz bırakıldı. Fotorezist kaplı örnek, 10 ml çözücü (AZ400K) ve 40 ml saf su karışımı çözeltisinde 30 sn bekletildi. Metalizasyon, 33,3 nm Ge, 66,6 nm Au ve ardından 35 nm Ni, 100 nm Au buharlaştırma ile yapıldı. Son olarak örnekler, çabuk ısıtıl

işlem (rapid thermal processing) cihazı kullanılarak 60 sn 425 °C'da tavlandı. Böylece omik kontak bağlantıları yapılmış oldu.

PL ölçümlerinde, yapının üst kısmında bulunan GaAs üst kontak tabakasının iç kısmı aşındırılarak, yapının içine daha fazla ışık girmesi sağlanmıştır. GaAs üst kontak tabakasının iç kısmını aşındırmak için 3. kez litografi işlemi tekrar edilmiştir. Bu işlem sonucunda GaAs üst kontak tabakasının iç kısmı 0,3 µm aşındırılmıştır.

Yapı 1, 2 ve 3 için farklı büyüklükte kare masatepeler oluşturuldu. Aynı yapıda farklı büyüklükte masatepeler oluşturulmasının nedeni, yapıların düzgünlüğünün ve üretim kalitesinin test edilmesidir.

Şekil 3.5'de bu çalışmada kullanılan örneklerden Yapı 2'nin paketlenmiş halleri görülmektedir.

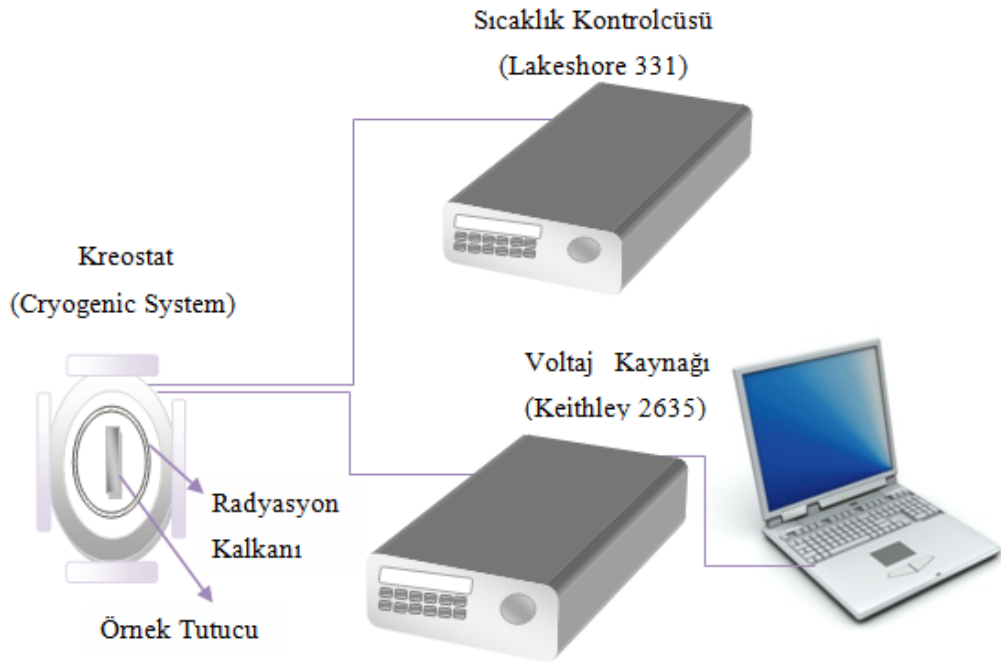


Şekil 3.5. Yapı 2'nin paketlenmiş hali.

### 3.5. Akım-Voltaj Ölçüm Düzeneği

Şekil 3.6 karanlık akım ölçümlerinde kullanılan deney düzeneğini göstermektedir. Karanlık akım ölçümlerinde örnek, kreostat/dewar (azot soğutmalı kap) içine konulur ve pencereler IR ışınımı geçirmeyecek şekilde kapatılır. Ölçümlerde, örneklerin kızılötesi ışınımı görmesini engellemek için kreostat içindeki örnek ile kreostat dış kılıfı arasına örnekle aynı sıcaklığa sahip radyasyon kalkanı konulur. Örneğin çalışma sıcaklığından emin olabilmek için, çalışma sıcaklığı 1,4-420 K arasında olan, 2 adet Cernox kalibre edilmiş diyet

kullanılmıştır. Örnek tutucu ile soğutucu kafa arasındaki ısı iletimin soruna sebep vermemesi için ara yüzeye indiyum tabaka konulmuştur. Örneklerin bulunduğu hazne,  $10^{-5}$  Torr vakum seviyesine gelene kadar pompalanmış ve sonrasında soğutma işlemi başlatılmıştır. Ölçüm birimi olarak Keithley 2635 kullanılmıştır: Örnek üzerinden geçen en yüksek akım sınırı olarak 100 mA tanımlanmış ve  $\pm 10$  V aralığında 50 mV basamaklarla voltaj uygulanarak akım değeri okunmuştur. Ölçülen veriler bilgisayar yazılımı ile kaydedilmiştir.



Şekil 3.6. Akım-Voltaj Ölçüm Düzenegi

### 3.6. Fotolüminesans Deney Düzenegi

Şekil 3.7, örneklerin geçiş enerjilerini belirlemek için kullanılan PL sistemini göstermektedir. PL ölçümlerinde, 1,96 eV enerjili ve 35 mW gücündeki lazerin, kapalı sistem Helyum (He) kreostat içindeki örnek üzerine  $L_1$  merceğiyle odaklanması sağlandı. Örnekten çıkan ışınlar,  $L_2$  mercek ile toplanıp paralel ışın demeti haline dönüştürüldü. Paralel ışın demeti,  $L_3$  merceğiyle MS-257 model monokromatör girişine odaklandı. Monokromatörde dalgalı boylarına ayrılan ışın demeti Hamamatsu PMT algılayıcı ile elektrik sinyaline dönüştürüldü. Örneğin

sıcaklığı, Lakeshore 331 model sıcaklık kontrolcüsü ile ayarlandı. Örnekten gelen sinyalin, dışarıdaki diğer ışık kaynaklarından etkilenmemesi için uyarma lazeri ışık kısıyıcısından (chopper) geçirilerek örnek üzerine düşürülmüştür. Kullanılan kısıyıcı frekansı, PMT dedektör sinyalinin okunduğu kilitlemeli yükselticiye (lock-in amplifier) gönderilerek, aynı frekansta ölçüm yapması sağlanmıştır.

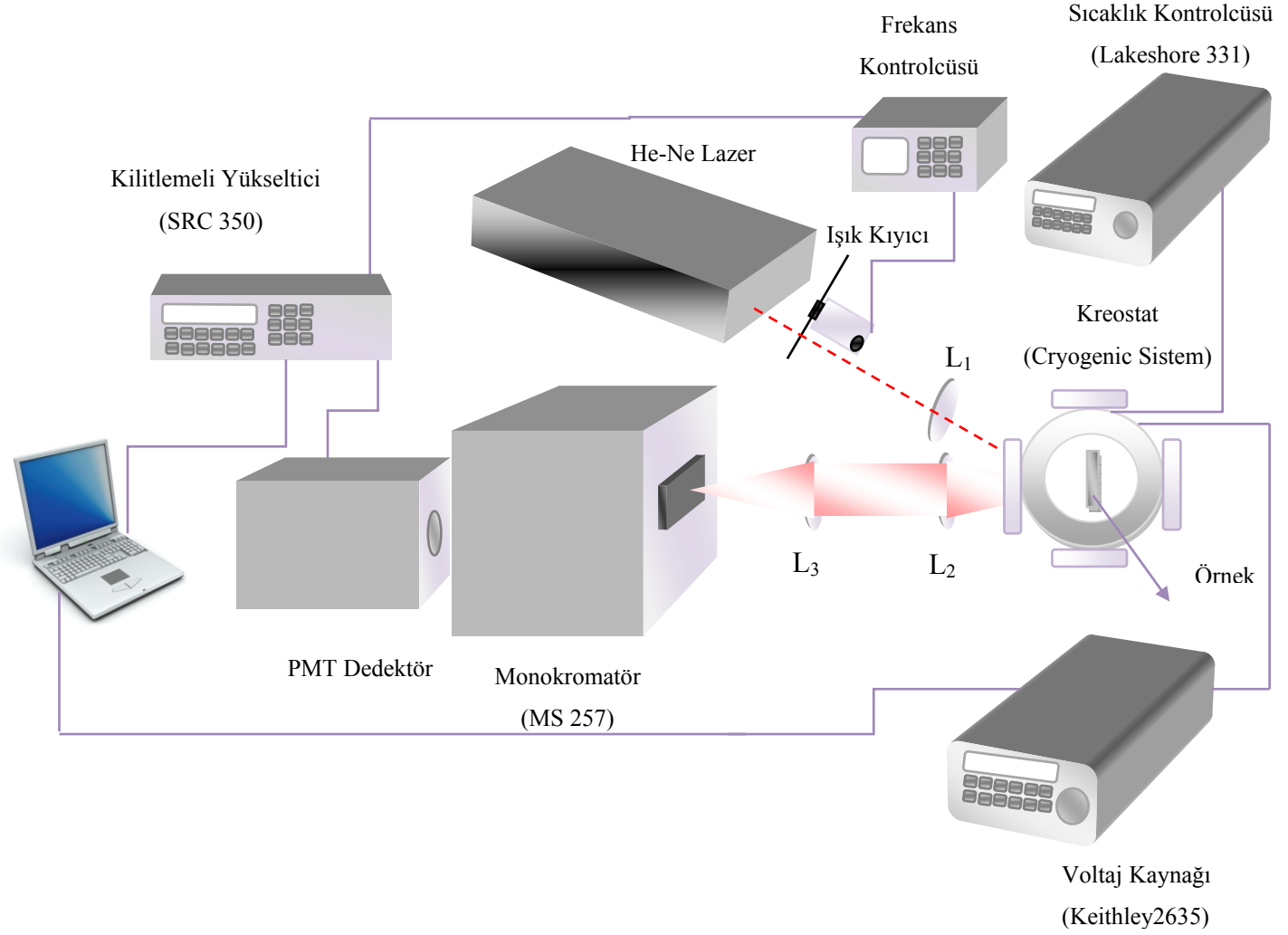
### 3.7. Fototepki Ölçümleri

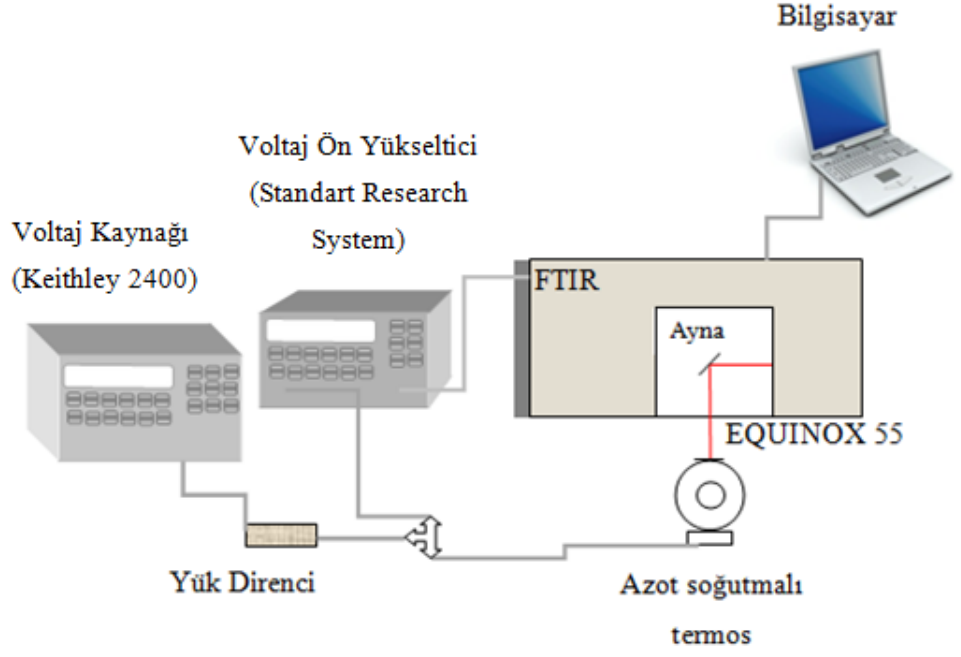
Tasarlanan yapıların kızılötesi tayfını belirlemek için, örneklerden alınan sinyalin, arkaplan sinyali düşünülerek düzeltilmesi gerekmektedir. Her ölçüm, örneğin ışığı soğurma özelliği dışındaki etmenlerden etkilenir. Işık kaynağı ve örnek arasındaki hava dâhil bütün optik birimlerin etkisi ölçümleri etkilemektedir. Bu nedenle, referans ölçümleri alınarak, örneğin kızılötesi tayf ölçümlerinde olası dış etkiler ortadan kaldırılır. Bu amaçla, örneklerden alınan sinyal, tayfsal tepkisi bilinen bir referans algılayıcı ile alınan arkaplan sinyaline bölünerek düzeltilmiştir.

FTIR (Fourier Transform Infrared) spektroskopisi, yapının kızılötesi tayfsal tepkisini elde etmek için kullanıldı. Ölçümü yapılacak örneklerin içine konulduğu sıvı azot soğutmalı Dewar'da IR geçirgenliği yüksek ZnSe pencere kullanıldı. Ölçümlerde kullanılan Bruker Equinox55 FTIR sisteminde Globar IR ışık kaynağı ve KBr ışın ayırıcı kullanıldı. Bütün ölçümler 80 K örnek sıcaklığında yapıldı.

Fototepki ölçümlerinde Şekil 3.8'deki ölçüm sistemi kullanıldı. Azot soğutmalı termos FTIR'ın numune haznesine içine girmediği için gelen IR ışın ayna yardımıyla dışarıya yönlendirildi. Elektrik bağlantıları yapılırken kullanılan yük direncinin varlık sebebi; yapı üzerine düşen voltajı kontrol edebilmek içindir. Örnekten gelen sinyal, voltaj ön yükseltici yardımıyla hem elektronik olarak filtrelenerek istenmeyen gürültüden arındırıldı hem de yükseltilerek FTIR'ın algılayabileceği sinyal seviyesine yükseltildi.

Şekil 3.7 Deneyde kullanılan voltaj bağlı PL ölçüm sistemi





Şekil 3.8. Fototepki ölçümlerinin alındığı FTIR düzenneği

## 4. GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As ALGILAYICILARIN OPTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Algılayıcılar, yarıiletken kristal katmanlar kullanılarak oluşturulan aygıtlardır. Profesyonel algılayıcılar, Bölüm 3.4’de tek piksel halinde üretim basamakları anlatılan aygıtların odak düzlem dizin (focal plane array, FPA) haline getirilmiş halleridir. FPA haline getirilmeden önce, büyütülen malzemenin kalitesini ve optik karakteristiğini belirlemenin en kolay yolu Bölüm 3.4’de anlatıldığı gibi tek piksel algılayıcılar üretmektir. Tek piksel ve FPA üretim ve ölçüm aşamaları son yıllarda yoğun olarak çalışılmıştır (Tidrow ve ark. 1999; Gu ve ark. 2007; Aoki ve ark. 2008; Hsu ve ark. 2008; Hiraio ve ark. 2008; Wang ve ark. 2008; Takamasu ve ark. 2002; Hegde ve ark. 2001; Kim 2006; Mendez ve ark. 1982).

### 4.1. PL Ölçümleri

PL ölçümleriyle, büyütülen GaAs/AlGaAs yapısındaki enerji seviyelerini, AlGaAs’daki Al oranlarını, büyütme sırasında yapıda oluşabilecek kusurları belirlemek mümkündür. Bu kısımda, büyütülen 3 kuantum kuyulu yapının (Yapı 1, 2 ve 3) PL karakteristiğinden bahsedilecektir.

Ayrıntıları Bölüm 3’de sunulan Yapı 1 ve 2, GaAs alttaş üzerine 50 Å ve 60 Å genişliğindeki kuyuların periyodik olarak tekrar edilmesinden oluşmaktadır. Yapı 3 örneği ise 50 Å, 60 Å ve 70 Å genişliğindeki kuyuların periyodik olarak tekrar edilmesinden oluşmaktadır.

GaAs’ın 4 K bant aralığı değeri Eşitlik 2.1 kullanılarak 1521,3 meV olarak bulunabilir. Çizelge 3.4’de verilen enerji değerleri kullanılarak, PL ölçümünde görülmesi gereken geçiş enerjileri hesaplanabilir:

50 Å genişliğindeki kuyudaki  $E_{1e}-E_{1h}$  arasındaki geçiş enerjisi;

$$E_{1e-1h} = E_{1e} + E_{1h} + E_g = 72,4 + 20,4 + 1521,3 = 1614,1 \text{ meV}$$

60 Å genişliğindeki kuyudaki  $E_{1e}-E_{1h}$  arasındaki geçiş enerjisi;

$$E_{1e-1h} = E_{1e} + E_{1h} + E_g = 54,4 + 14,8 + 1521,3 = 1590,5 \text{ meV}$$

70 Å genişliğindeki kuyudaki  $E_{1e}-E_{1h}$  arasındaki geçiş enerjisi;

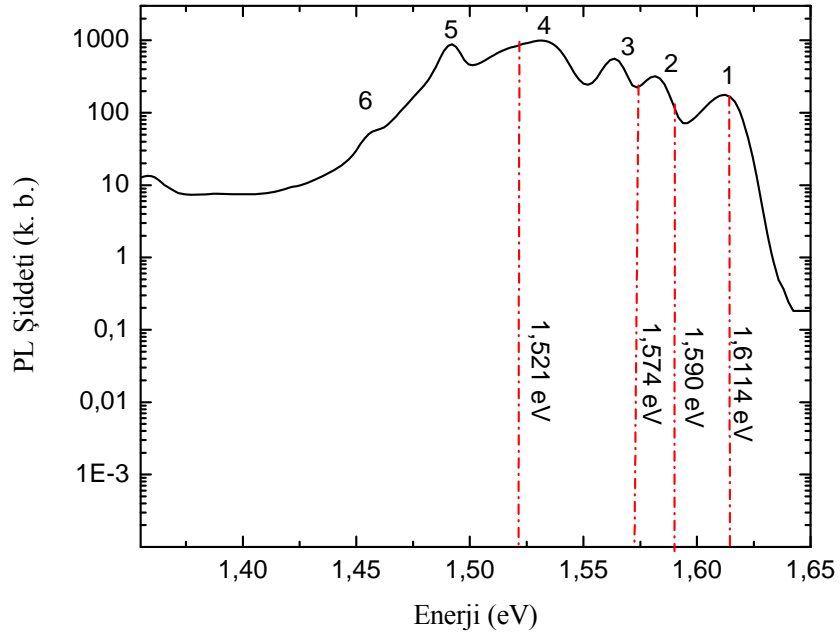


$$E_{1e-1h} = E_{1e} + E_{1h} + E_g = 42,0 + 11,2 + 1521,3 = 1574,5 \text{ meV}$$

değerine sahiptir.

Yapı 3, Yapı 1 ve 2’de bulunan kuantum kuyularına ek olarak 70 Å kuantum kuyulara sahip olduğu için geçiş enerjileri Yapı 3’ün PL grafiği kullanılarak gösterilmiştir. Şekil 4.1, 10 K’de yapılan PL ölçüm sonucunu göstermektedir.

Şekil 4.1’de 1, 2 ve 3 numarayla gösterilen tepeler, sırasıyla 50 Å, 60 Å ve 70 Å genişliğindeki kuyulardaki  $E_{1e}-E_{1h}$  geçişlerine karşılık gelmektedir. Bu geçişler için yukarıda hesaplanan değerler dikey olarak grafikte gösterilmiştir. Hesaplanan değerler ve gözlenen değerler arasındaki farkın iki sebepten kaynaklanabileceği düşünülmektedir: Birincisi, büyütme parametrelerinin hedeflenen değerlerden bir miktar farklı olmasıdır. İkincisi ise, ölçüm sırasında örneğin gerçek sıcaklığının 10 K değil, daha fazla olmasıdır. Yapıların üst kısmındaki katkı GaAs kontak katmanının bulunması 4 ve 5 numaralı tepeleri oluşturmaktadır. 6 numaralı tepe ise yapıdaki kusurlardan kaynaklanmaktadır.

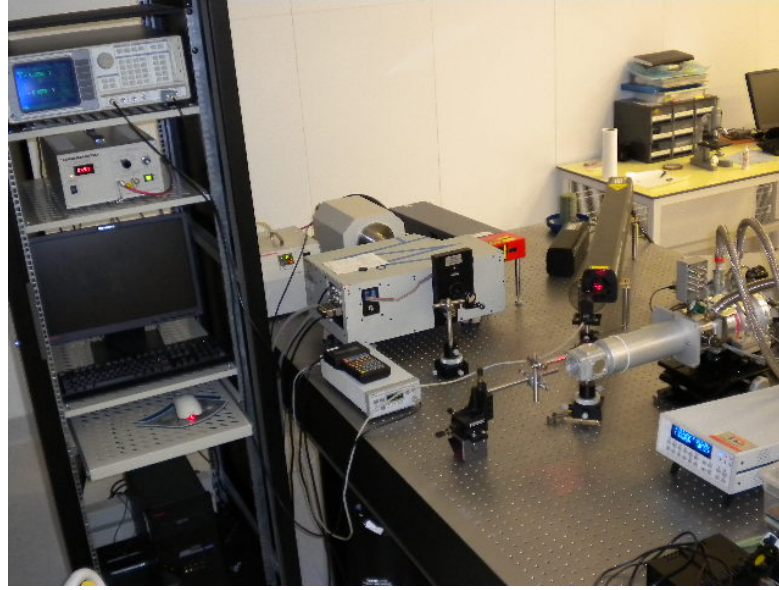


Şekil 4.1. Yapı 3’ün 10 K’deki PL tayfı ve teorik olarak hesaplanan enerji geçişleri

PL ölçümlerinde Al konsantrasyonuna bağlı AlGaAs bant aralığının gözlemlenmesi de mümkün olmaktadır. Fakat yapılan ölçümlerde bu değerlere karşılık gelen tepeler tam olarak gözlemlenememiştir.

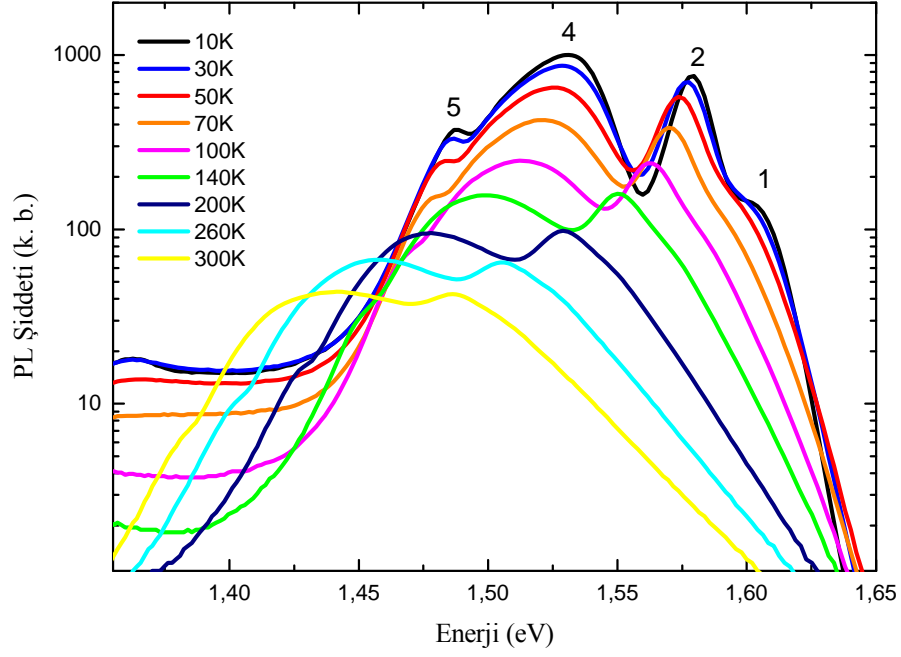
#### 4.1.1. Sıcaklık bağımlı PL ölçümleri

Şekil 4.2’de çıplak yapıların ölçüldüğü sıcaklık bağımlı PL deney düzeneği gösterilmektedir. Bu ölçümlerde, 632 nm dalgaboyunda, 35 mW gücündeki He-Ne lazer, yapıları uyarmak için kullanılmıştır. Sıcaklık bağımlı PL ölçümleri 10-100 K arasında 10 K aralıklarla, 100-160 K arasında 20 K aralıklarla alınmış ve ilaveten 200, 220, 260 ve 300 K sıcaklık değerlerinde yapılmıştır.



Şekil 4.2. Sıcaklık bağımlı PL düzeneği

Şekil 4.3, Yapı 1’in sıcaklığa bağımlı PL tayfını göstermektedir. Yapı 1 örneğinde, Yapı 2 örneğinden farklı olarak 60 Å genişliğindeki kuyular, 50 Å genişliğindeki kuyulardan daha fazladır. Şekil 4.3’de 10 K sıcaklığında verilen tepeler, Şekil 4.1’de kuyu genişliklerine karşılık gelen numaralarla uyumlu olarak 5, 4, 2, 1 olarak isimlendirilmiş ve sırasıyla 1,487 eV, 1,529 eV, 1,579 eV, 1,602 eV enerji değerlerine karşılık gelmektedir. 1 numaralı tepe 50 Å genişliğindeki kuyu için  $E_{1e}-E_{1h}$  geçişine karşılık gelmektedir; 2 numaralı tepe 60 Å genişliğindeki kuyu için  $E_{1e}-E_{1h}$  geçişine. 4 ve 5 numaralı tepeler ise yapının üst kısmında bulunan GaAs’dan gelmektedir.



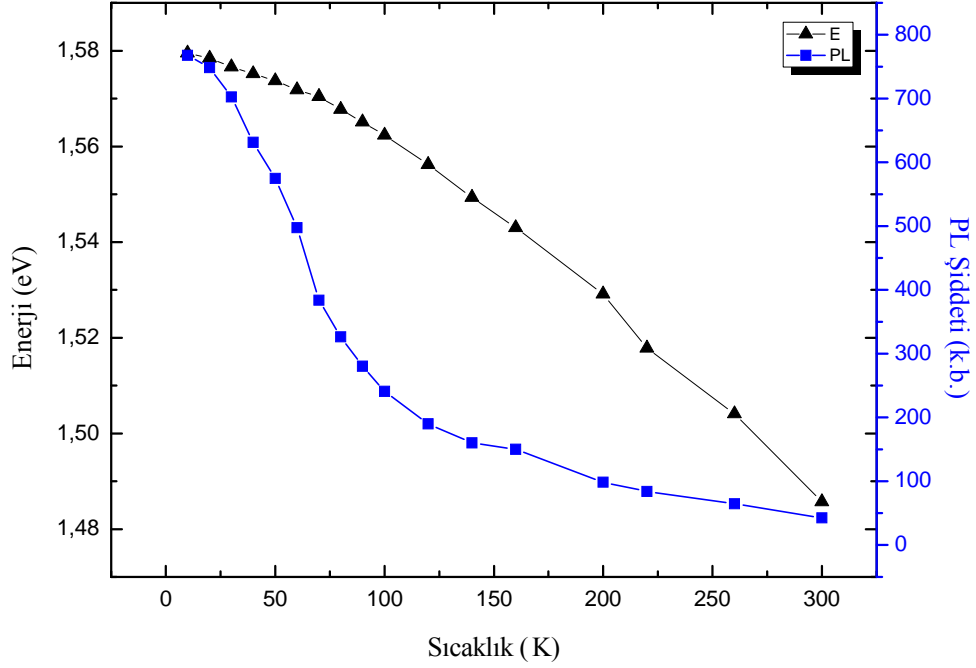
**Şekil 4.3.** Yapı 1'in sıcaklık bağımlı PL ölçümleri

Şekil 4.3'den görüldüğü gibi sıcaklık azaldıkça tüm tepelerin şiddeti artmaktadır. Tepelerin şiddetindeki değişimlerin grafikte daha anlaşılır olması için ara sıcaklık değerleri gösterilmemiştir. 10 K'de belirgin olan 1 ve 5 numaralı tepelerin, sistem sıcaklığı 300 K'e çıkarıldığında 2 ve 3 numaralı tepelerin içinde kaybolduğu görülmektedir. Ayrıca, sıcaklık artışıyla tepe enerjilerinin azaldığı gözlenmektedir.

Eşitlik 2.1 ifadesi gereğince sıcaklık arttıkça GaAs yasak enerji aralığı küçülecektir. Bu nedenle, sıcaklık arttıkça tepelerde düşük enerjilere kayma beklenen bir durumdur.

Düşük sıcaklıklarda PL ölçümlerinde, ekziton ve sığ safsızlık tuzaklıkları sıklıkla görülür. Sıcaklık arttıkça, ekzitonlar birbirinden ayrılır ve taşıyıcılar sığ tuzak seviyelerini terk eder ve böylece PL tepesinin şiddeti azalır.

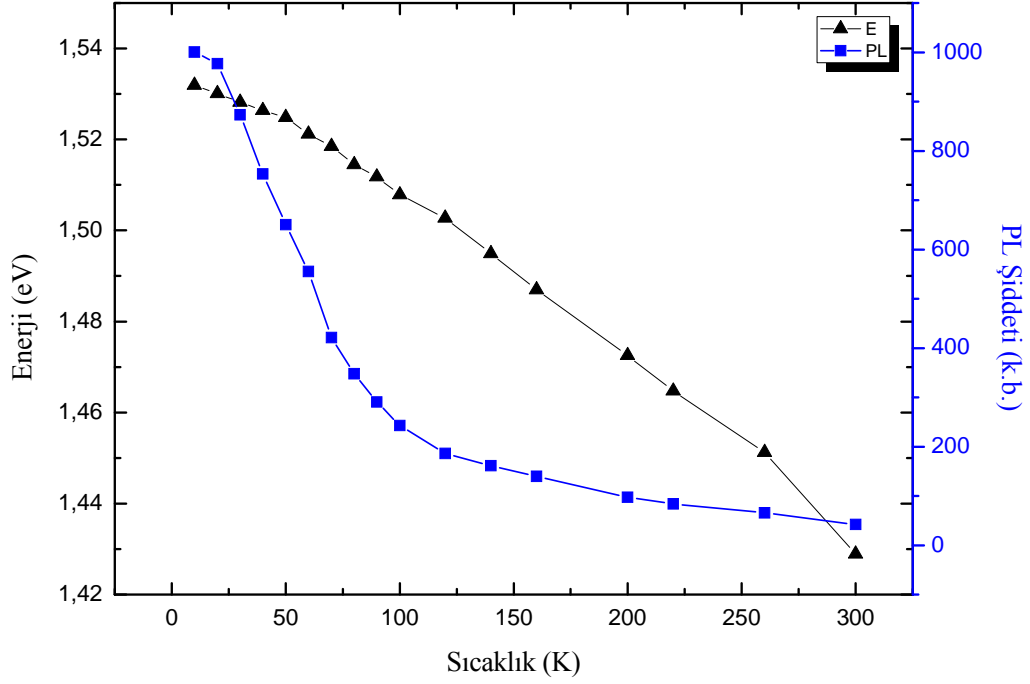
Şekil 4.4, Şekil 4.3'deki 2 numaralı tepenin sıcaklığa bağlı geçiş enerji değerlerini ve PL şiddetini göstermektedir. Sıcaklık arttıkça 2 numaralı tepenin, beklendiği gibi, geçiş enerjisinde ve PL şiddetinde azalma olduğu görülmektedir.



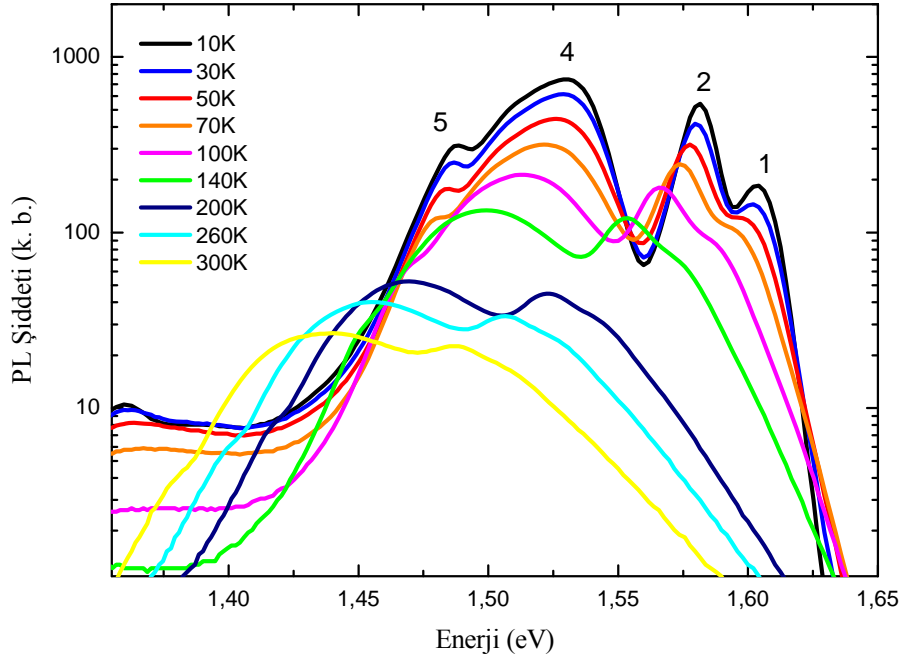
Şekil 4.4. Sıcaklıkla, Yapı 1'deki tepe 2'nin enerji ve PL şiddetindeki değişim

Şekil 4.5, Şekil 4.3'deki 4 numaralı tepenin sıcaklığa bağlı geçiş enerji değerini ve PL şiddetini göstermektedir. Sıcaklık arttıkça 4 numaralı tepenin de 2 numaralı tepe gibi geçiş enerjisinde ve PL şiddetinde azalma olmaktadır.

Şekil 4.6, Yapı 2'in sıcaklığa bağımlı PL tayfını göstermektedir. Şekil 4.6'daki 10 K sıcaklığında verilen tepeler, Şekil 4.1'de kuyu genişliklerine karşılık gelen numaralı tepelerle uyumlu olarak 5, 4, 2 ve 1 olarak isimlendirilmiş ve sırasıyla 1,487 eV, 1,529 eV, 1,579 eV ve 1,602 eV enerji değerlerine karşılık gelmektedir. Şekil 4.6 incelendiğinde PL ölçümlerinde sıcaklık azaldıkça, beklendiği gibi, seviye geçişlerine karşılık gelen tepelerin enerji değerleri yüksek enerjilere kaymakta ve PL şiddetinin değeri artmaktadır.



Şekil 4.5. Yapı 1'deki GaAs'ın sıcaklıkla enerji ve PL şiddetindeki değişim

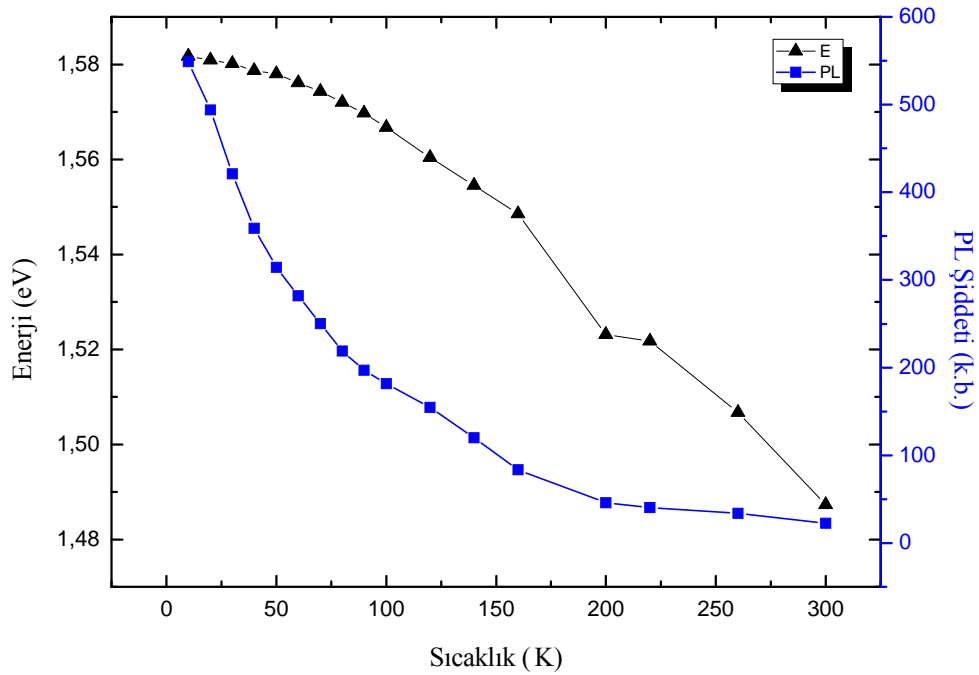


Şekil 4.6. Yapı 2'nin sıcaklık bağımlı PL ölçümleri

Yapı 1'deki 50 Å genişliğindeki kuyulardaki Si katkısının Yapı 2'dekilere göre çok olması, optik geçişlerin şiddetini etkilemektedir. Yapı 2'deki 60 Å genişliğindeki kuyuda  $E_{1e}-E_{1h}$  geçişine karşılık gelen 2 numaralı (Şekil 4.6) tepenin şiddeti, Yapı 1 örneğinde bulunan 60 Å genişliğindeki

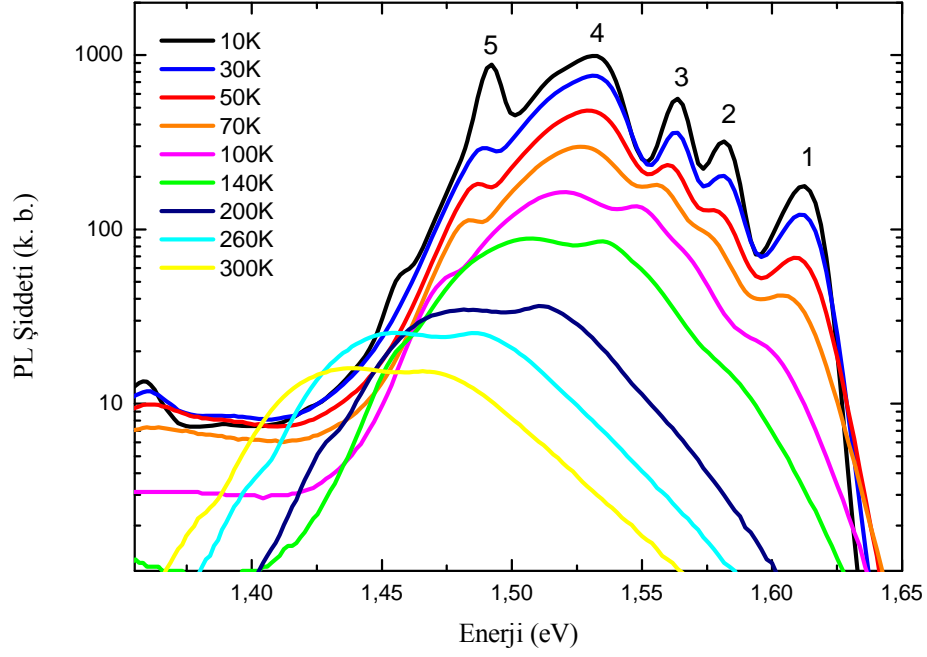
kuyudaki  $E_{1e}-E_{1h}$  geçişine karşılık gelen 2 numaralı tepenin (Şekil 4.3) PL şiddetinden daha düşüktür. Bu durum, Yapı 1'deki 60 Å genişliğinde kuantum kuyu sayısının Yapı 2'deki 60 Å genişliğindeki kuantum kuyu sayısından çok olmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 4.7, Şekil 4.6'daki 2 numaralı tepenin sıcaklığa bağlı geçiş enerji değerlerini ve PL şiddetini göstermektedir. Sıcaklık arttıkça, beklendiği gibi, 2 numaralı tepenin geçiş enerjisinde ve PL şiddetinde azalma olduğu görülmektedir.



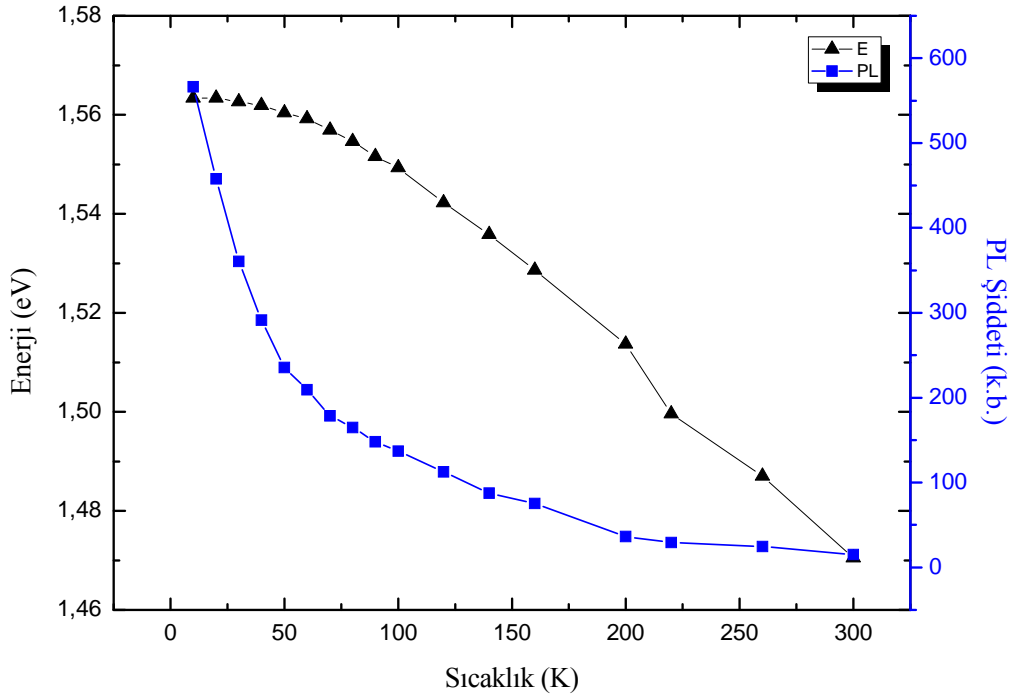
Şekil 4.7. Sıcaklığa bağlı, Yapı 2'deki tepe 2'nin enerji ve PL şiddetindeki değişim

Şekil 4.8, Yapı 3'ün sıcaklık bağımlı PL ölçümlerini göstermektedir. 1 numaralı tepe 1,60 eV değerine karşılık gelen 50 Å genişliğindeki kuyuların  $E_{1e}-E_{1h}$  geçişine, 2 numaralı tepe 1,58 eV değerine karşılık gelen 60 Å genişliğindeki kuyuların  $E_{1e}-E_{1h}$  geçişine, 4 ve 5 numaralı tepeler yapının üst kısmındaki GaAs bant aralığı geçişine karşılık gelmektedir. Yapı 3 PL grafiğinde, Yapı 1 ve Yapı 2'in PL grafiğinden farklı olarak 3 numaralı tepe gözükmemektedir. 3 numaralı tepe ise 1,56 eV değerinde 70 Å genişliğindeki kuyuların  $E_{1e}-E_{1h}$  geçişine karşılık gelmektedir.



Şekil 4.8. Yapı 3'ün sıcaklık bağımlı PL ölçümleri

Şekil 4.9, Şekil 4.8'deki 2 numaralı tepenin sıcaklığa bağlı geçiş enerji değerini ve PL şiddetini göstermektedir. Sıcaklık arttıkça, beklendiği gibi, 2 numaralı tepenin geçiş enerjisinde ve PL şiddetinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.9. Sıcaklığa bağlı, Yapı 3'deki tepe 2'nin enerji ve PL şiddetindeki değişim

Sonuç olarak; sıcaklık bağımlı PL ölçümleri ile, 300 K'de gözlemleyemediğimiz kuyuların enerji seviyeleri arasındaki geçişleri gözlemleyebildik ve yapılarıdaki kuyu genişlikleri ve bariyer yüksekliklerinin düzgün büyütüldüğü sonucuna vardık.

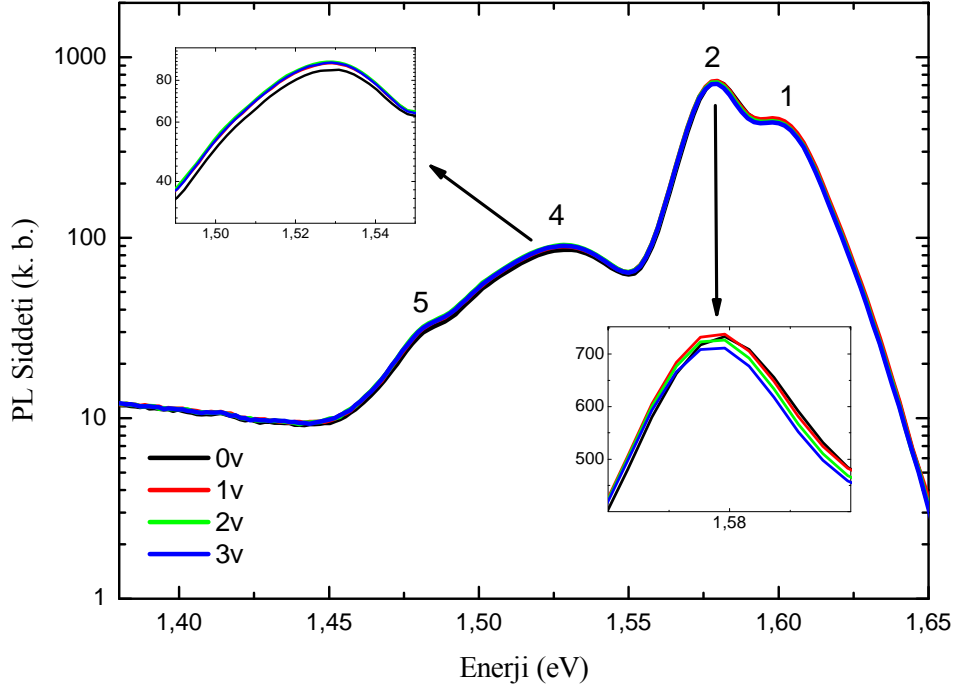
#### 4.1.2. Voltaj Bağımlı PL Ölçümleri

Aygıt üretimi yapılmış örneklerle yapılan voltaj bağımlı PL ölçümlerinde örnekler, azot soğutmalı kabın (dewar) içinde 80 K'de tutulmuştur. 1,96 eV enerjisine sahip 7 mW gücünde HeNe lazer ile örnekler uyarılmıştır. Voltaj bağımlı PL ölçümlerinde örneğe -5 V ile 7 V arasında voltaj uygulanmıştır (Şekil 3.7).

Voltaj bağımlı PL ölçümlerinde, örneklere voltaj uygulanabilmesi için yapı üzerinde bağlantı noktaları oluşturmak gerekir. Bu bağlantı noktaları, yapının cihaz haline getirilmesiyle oluşur. Yapının cihaz haline getirilme işlemi esnasında yapının üst kısmında bulunan GaAs tabakası aşındırıldığı için, voltaj bağımlı PL ölçümlerindeki GaAs'a karşılık gelen 4 numaralı tepenin şiddeti (Şekil 4.10), sıcaklık bağımlı PL ölçümlerindeki GaAs'a karşılık gelen 4 numaralı (Şekil 4.3) tepeninkine göre daha düşük sinyale sahiptir.

Şekil 4.10'da Yapı 2, 50 Å ve 60 Å genişliğindeki kuyularında meydana gelen enerji geçişlerinin voltaj altındaki değişimlerini göstermektedir. 1,600 eV enerjisine karşılık gelen 1 numaralı tepe 50 Å'luk kuyu içindeki  $E_{1e}-E_{1h}$  geçişine karşılık gelmektedir. 1,576 eV enerjisine karşılık gelen 2 numaralı tepe ise 60 Å'luk kuyu içindeki  $E_{1e}-E_{1h}$  geçişine karşılık gelmektedir. 1,530 eV enerjisine karşılık gelen 4 numaralı tepe yapı üzerindeki GaAs'dan gelmektedir.



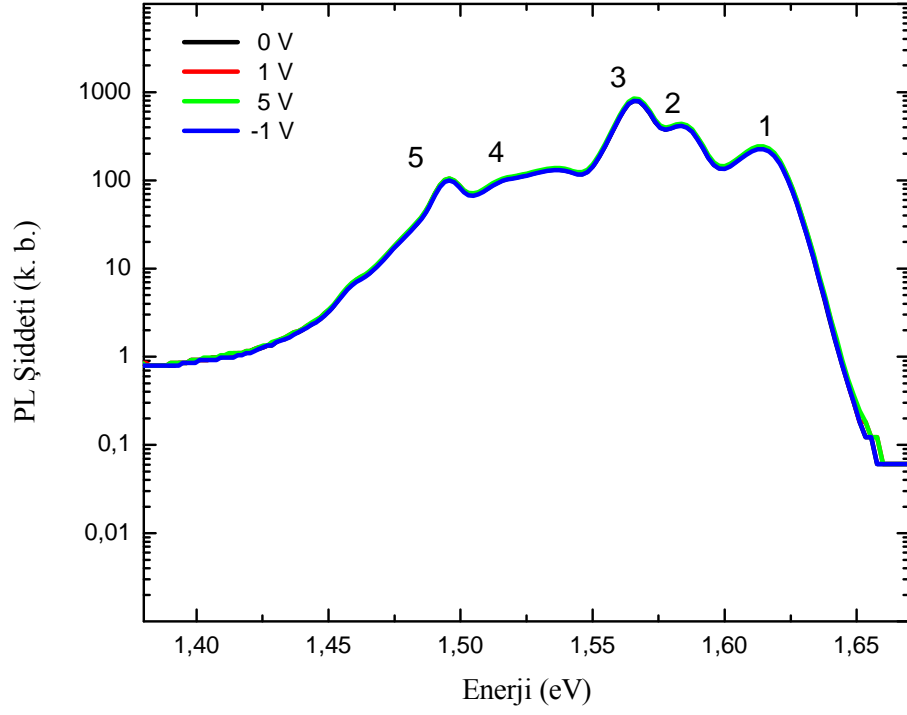


**Şekil 4.10.** Yapı 2'nin 80 K'de voltaj bağımlı PL ölçümleri

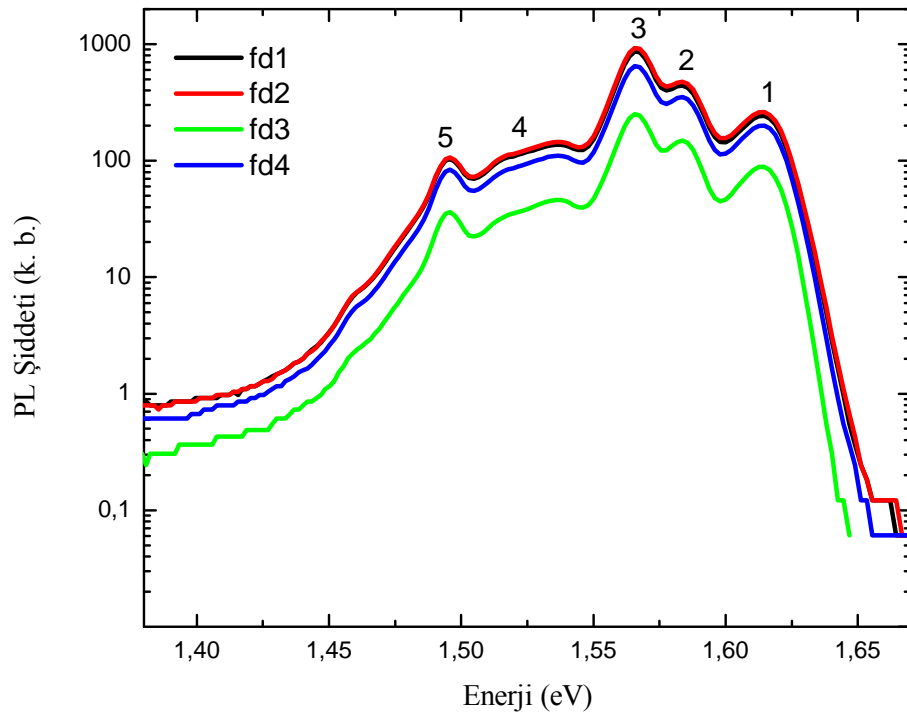
Yapı 2'nin, üzerine uygulanan farklı voltajlar altında PL sinyalinde uygulanan voltaja bağlı önemli bir değişiklik görülmemiştir (Şekil 4.10). 4 V, 5 V, -1 V, -2 V, -3 V, -4 V, -5 V ve -7 V voltajları uygulanarak ölçümler alınmış ancak kayda değer bir değişiklik görülmemiştir. Ölçümler Yapı 1 ve Yapı 3 için de aynı voltaj değerlerinde tekrarlanmış, ölçüm sonuçlarında önemli bir değişiklik görülmemiştir.

Sonuç olarak; PL ölçümleri ile yapının içinde var olan kuyulardaki enerji seviyeleri arasındaki geçişleri gözlemlerken, voltaj bağlı PL ölçümlerinde voltajın yapıların PL ölçümlerinde önemli bir değişikliğe sebebiyet vermediği yalnızca şiddetini az miktar değiştirdiği görülmektedir.

Voltaj bağımlı PL ölçümlerinde kullanılan HeNe lazerin gücünün az olduğu ve sıcaklığın fazla olduğu düşüncesiyle, deneyler daha düşük sıcaklıklarda ve daha yüksek güce sahip lazer ile tekrarlanmıştır. He soğutmalı kreostat içine yerleştirilen örnekler 10 K'e kadar soğutuldu ve 35 mW gücünde, 632 nm dalgaboyunda lazer ile uyarılarak PL sinyallerine bakıldı. 10 K'de Yapı 3 için alınan sonuçlardan (Şekil 4.11), sıcaklık değeri düştükçe 1-2-3-4-5 numaralı tepelerin birbirinden daha fazla ayırt edilebilir hale gelmesine rağmen, voltajla değişen bir PL karakteristiği gözlenmemiştir.



Şekil 4.11. Yapı 3'ün 80 K'de voltaj bağımlı PL ölçümleri



Şekil 4.12. Yapı 3'ün 10 K'de lazer şiddetine bağımlı PL ölçümleri

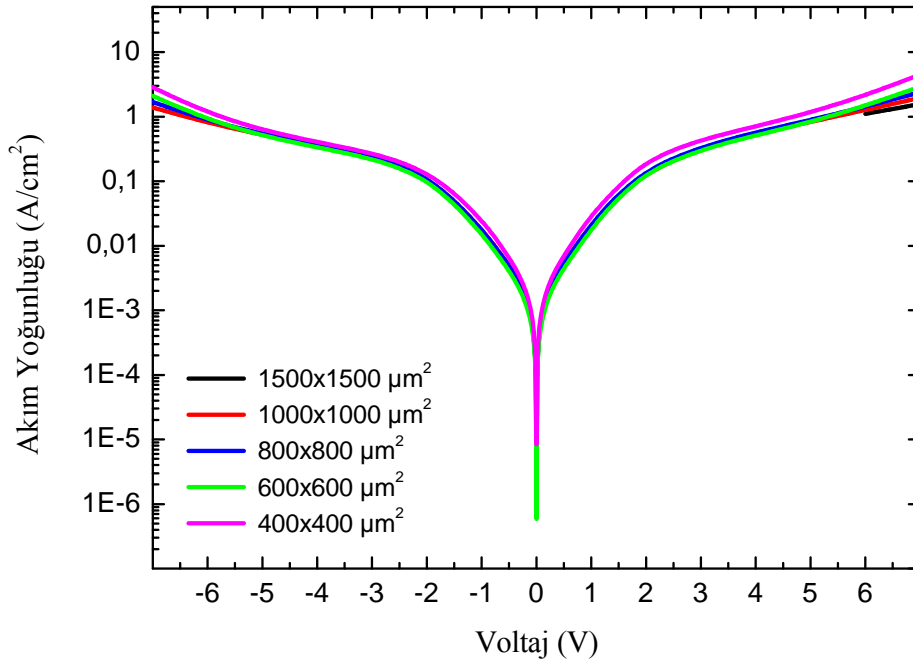
Lazer şiddetine bağımlı PL ölçümleri; He soğutmalı kreostat, 35 mW gücünde ve 632 nm dalgaboyunda lazer ve lazerin şiddetini değiştiren filtre kullanılarak Yapı 3 için 10 K'de yapıldı. 10 K'de alınan sonuçlardan (Şekil 4.12), lazerin şiddeti azaldıkça 1-2-3-4-5 numaralı tepelerin şiddeti de eşit oranda azaldığı gözlemlendi. Lazer şiddetinin değişiminin yapı üzerinde önemli bir değişiklik yaratmadığı sadece şiddetini değiştirdiği görülmektedir. Şiddetinin değişim sebebi ise, taşıyıcıları uyaran foton miktarı azaldıkça ışımaya katılan taşıyıcı sayısının da azalmasıdır. Taşıyıcı sayısının azalması PL şiddetinin azalmasına sebep olur.

## 5. GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As ALGILAYICILARIN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

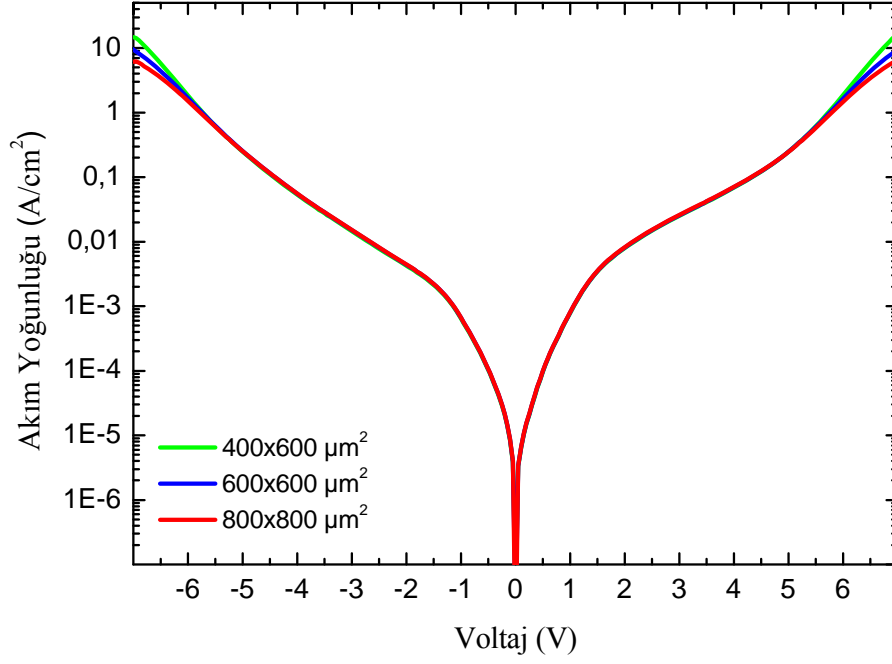
Akım-voltaj ölçümleri, yapının kontak kalitesi, yapının düzgünlüğünün ve aygıt üretim kalitesinin test edilmesiyle bitlikte taşıyıcıların akış mekanizmalarının anlaşılması için önemlidir.

### 5.1. Akım – Voltaj Ölçümleri

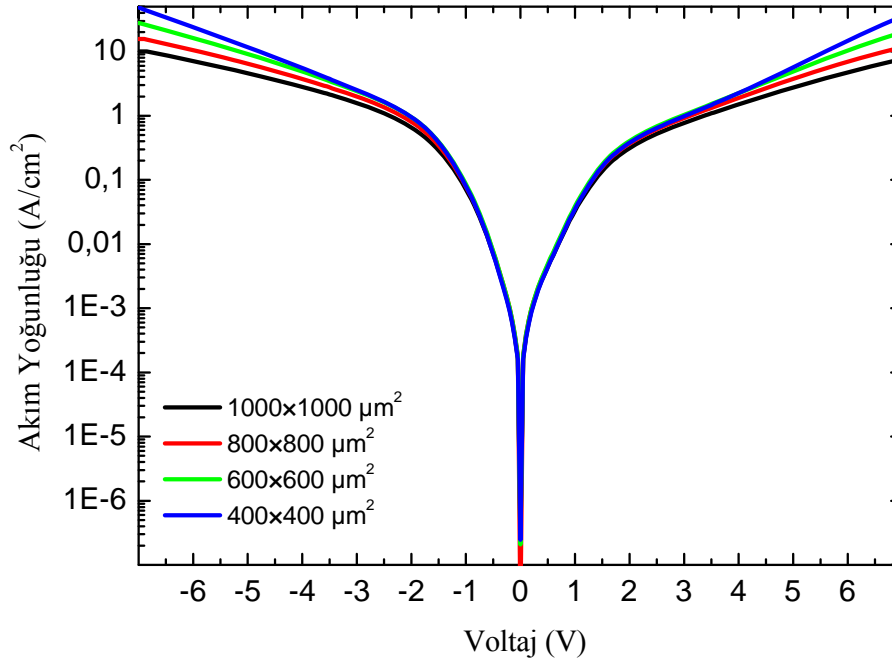
Yapı 1, 2 ve 3 azot soğutmalı kap içine konularak (80 K sıcaklıkta) karanlık akım ölçümleri alındı. Karanlık akım ölçümlerinden yararlanılarak çizilen akım yoğunluğu-voltaj grafikleri aygıtların düzgün üretilip üretilmediği hakkında bilgi sağladı. Şekil 5.1-5.3’de farklı büyüklükteki masatepelere sahip Yapı 1, 2 ve 3’ün akım yoğunluğu-voltaj grafiklerini göstermektedir.



Şekil 5.1. Yapı 1 için 80 K’de farklı büyüklükteki masatepelere ait akım yoğunluğu-voltaj grafiği



Şekil 5.2. Yapı 2 için 80 K’de farklı büyüklükteki masatepelerin akım yoğunluğu-voltaj grafiği



Şekil 5.3. Yapı 3 için 80 K’de farklı büyüklükteki masatepelerin akım yoğunluğu-voltaj grafiği

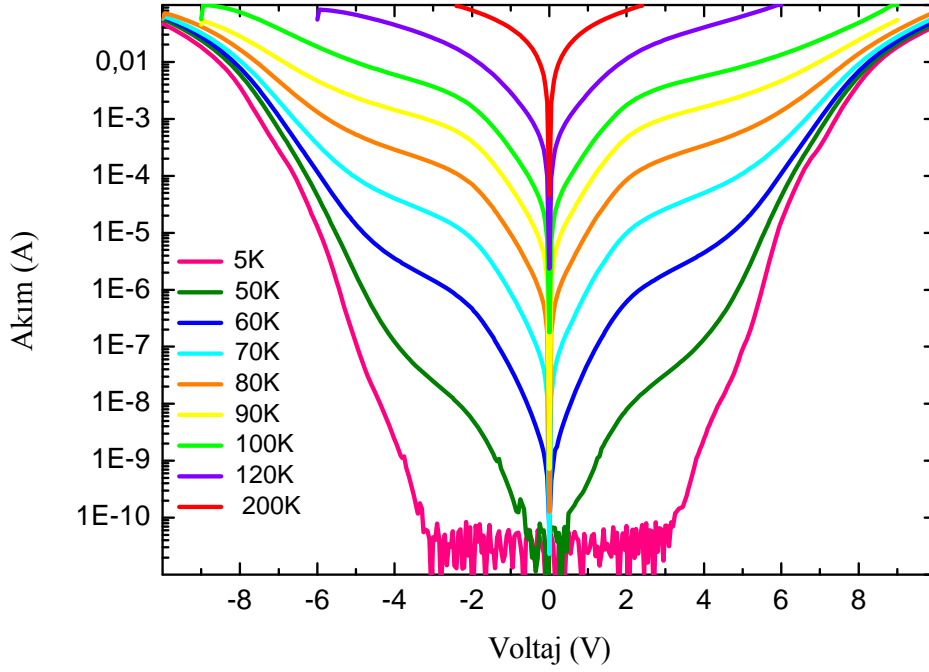
Yapı içinden geçen akım miktarları düşünüldüğünde, masatepe büyüklüğü azaldıkça geçen akım miktarının azalması gerekmektedir. Akım yoğunluğu, birim alan başına akım olduğundan, aynı voltaj uygulanan farklı masatepelerin akım yoğunluklarının aynı değere karşılık gelmesi gerekir. Yapıların 80 K’deki karanlık akım yoğunluklarının voltaja göre değişimine

bakıldığında (Şekil 5.1-5.3), her bir yapı için farklı büyüklükteki masatepelerden aynı akım yoğunluğu değerinin elde edildiği görülür. Bu, hem büyütülen yapıların hem de yapılan aygıt üretme işlemlerinin düzgün olduğunun göstergesidir.

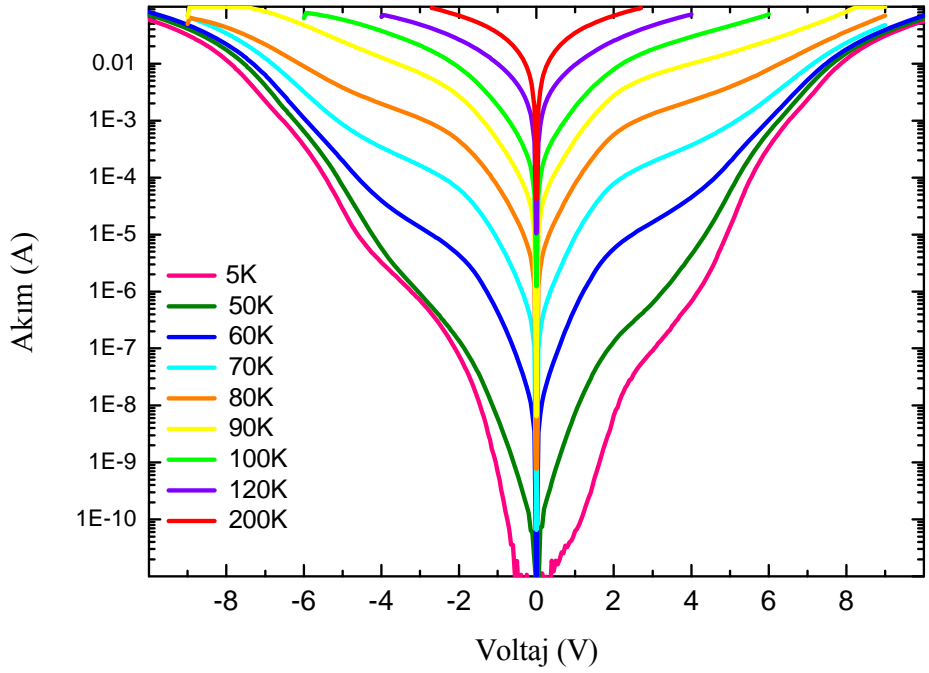
Grafiklerde görülen belli bir voltaj değerinden sonraki ayrılmalar (büyük voltaj, yüksek akım), seri direnç etkisinden kaynaklanmaktadır. Seri direncin kaynağı temel olarak kontak noktalarından gelmektedir: masatepenin büyüklüğünün artması, üst kontak ile alt kontak noktalarının arasındaki mesafenin artması bu direncin büyüklüğünü artırır. Adı geçen bölgede yapının kendi direncinin azalmasıyla, bu iki direnç büyüklükleri aynı noktaya gelmektedir. Bu durumda da büyük olan seri direnç (büyük masatepe), tüm eğriyi kenarlara doğru daha fazla çekmektedir.

**Karanlık Akım Ölçümleri:** Gürültü, algılayıcının performansını olumsuz olarak etkileyen, istenmeyen bir durumdur. Bazı gürültü kaynakları temeldir ve sakınılamaz. Örneğin; fotonların sayısının mutlak sabit orana ulaşamaması, algılayıcının içindeki atomların düşük sıcaklıkta bile titreşmesi ve elektronların rastgele hareket etmesi bir gürültü oluşturmaktadır. Bunun dışında aygıt ve kabloların elektriksel etkileşimi, sıcaklık dalgalanması, mekanik titreşimler gibi dış etkilerden kaynaklanan gürültüler azaltılabilir (Jelen 1998).

He soğutmalı kreostat ile 5 K'e kadar düşürülen Yapı 1, 2 ve 3'ün sıcaklığa bağlı karanlık akım değişimleri Şekil 5.4-5.7'de verilmiştir. 5 K ve 50 K arasındaki sıcaklık değerlerinde de ölçümler alınmış ancak yaklaşık 40 K'ne kadar büyük değişiklikler görülmemiştir. Bu nedenle grafikte görsel karışıklık olmaması için gösterilmemiş ancak sonraki bölümlerde bahsedilen BLIP ve aktivasyon enerjisi analizlerinde işleme alınmıştır.



Şekil 5.4. Yapı 1'in  $400 \times 400 \mu\text{m}^2$  masatepe yapısı için farklı sıcaklıklarda gözlenen karanlık akım-voltaj grafiği



Şekil 5.5. Yapı 1'in  $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$  masatepe yapısı için farklı sıcaklıklarda gözlenen karanlık akım-voltaj grafikleri

Şekil 5.4-5.5'de, Yapı 1'de bulunan  $400 \times 400 \mu\text{m}^2$  ve  $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$ 'lik masatepelerin sıcaklık bağımlı akım-voltaj grafikleri gösterilmiştir. Beklendiği gibi, büyük masatepeden geçen akım miktarı, küçük olana kıyasla daha fazladır.

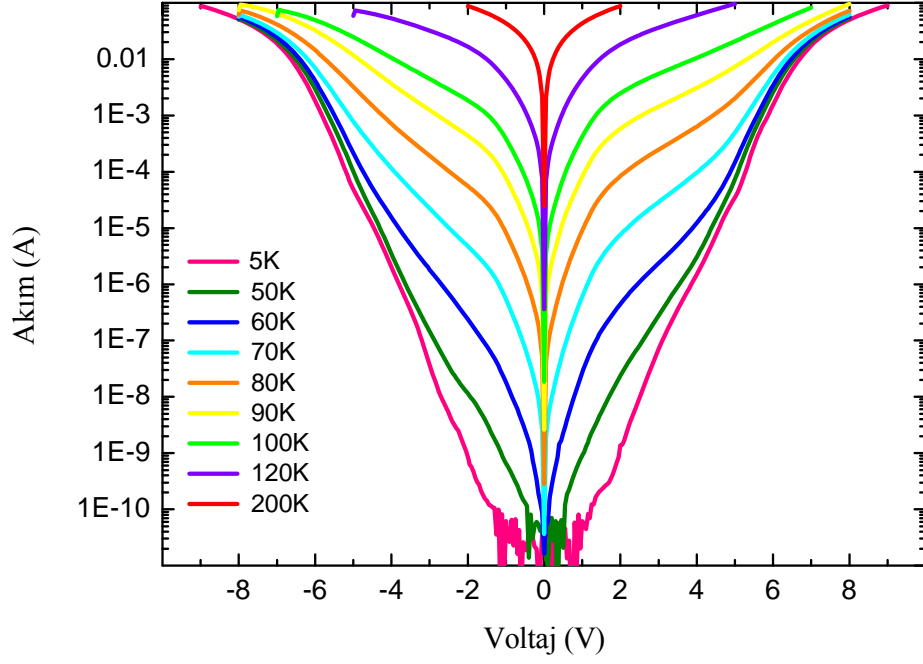
Şekil 5.4'de +3 V ve -3 V arasında kalan (<100 pA) gürültülü bölgenin sebebi, yapı içinden geçen toplam akım miktarının, kullanılan kablolarla (eşeksenli: koaksiyal kablo) ölçülebilecek değerlerden düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Bu bölge, büyük masatepe için toplam akım miktarı daha fazla olduğu için çok daha küçük bir bölgede kendisini göstermektedir (Şekil 5.5; +0,5 V ve -0,5 V arası).

Şekil 5.5'deki karanlık akım grafiği incelendiğinde, yapının düşük voltajlarda akımı hızlıca arttığı, yaklaşık 2-4 V arasındaki bölgede akım artışının azaldığı, yüksek voltajlarda ise akım artışının tekrar hızlandığı görülmektedir. Örnek, 200-80 K aralığında soğutulduğunda, -2 V gerilim altında akım değeri yaklaşık 150 kat azalmaktadır (termiyonik emisyonun aktif olması nedeniyle). 8 V'den daha büyük voltaj değerleri için, düşük sıcaklıklarda I-V eğrileri birbirine yaklaşmaktadır. Şekil 5.5'deki eğrilerin yüksek voltaj değerlerinde birbirine yaklaşması, bariyerler boyunca tünelleme akımından kaynaklanabileceği düşünülmektedir (Donchev ve ark. 2002).

Yapı 1, 7-10 µm kesim dalgaboyuna karşılık gelen kuantum kuyulardan oluşmaktadır. Şekil 5.4 incelendiğinde, 40 K civarında ve daha düşük sıcaklıklardaki gürültünün DT ile ilgili kusurlardan kaynaklı olduğu düşünülmektedir (Tidrow ve ark. 1999). Bu gürültü akımı, yüksek kaliteli III-V materyallerinin büyütülmesi ve özenli aygıt üretimiyle azaltılabilir. 40 ile 70 K sıcaklık aralığında, TAT baskın olduğu söylenebilir (Tidrow ve ark.(1999). 70 K'den daha yüksek sıcaklıklarda ise elektronlar ısıl enerjiyle uyarılarak bariyerlerin üzerinden akışına devam eder. Bunu azaltmak için yapı içindeki katkılama azaltılabilir ya da ince engel bariyerleri konulabilir.

Şekil 5.6'daki Yapı 2, 800×800µm<sup>2</sup> masatepe yapısı karanlık akım grafikleri incelendiğinde, Yapı 1'deki akım-voltaj karakteristiğine benzediği görülmektedir. Yapıya uygulanan -2 V gerilim altında, sıcaklık 80 K'den 5 K'e indirildiğinde, akımın 10<sup>5</sup> kat azaldığı görülmektedir.

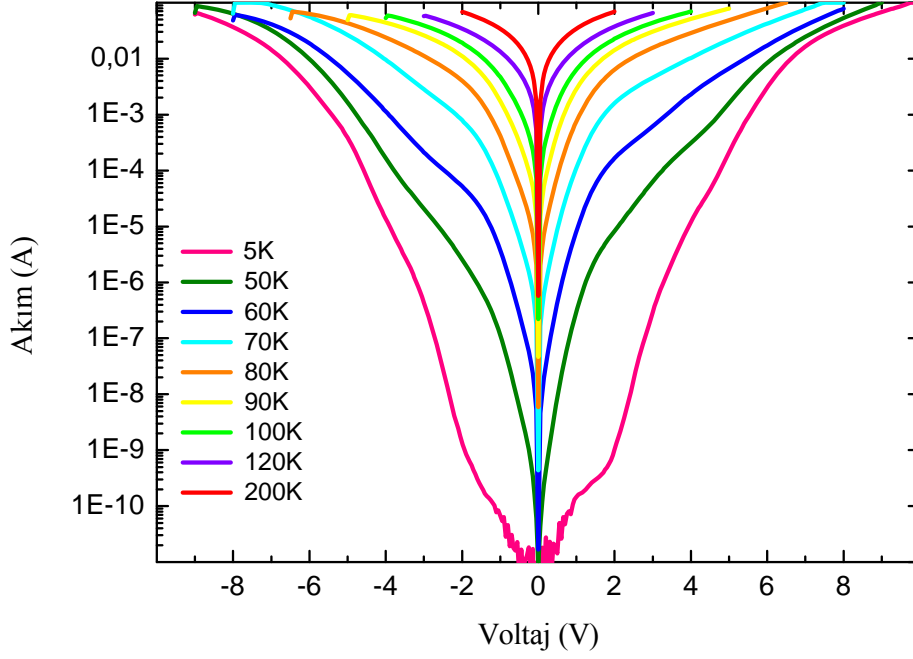




Şekil 5.6. Yapı 2,  $800 \times 800 \mu\text{m}^2$  masatepe yapısı için farklı sıcaklıklarda gözlenen karanlık akım-voltaj grafiği

Şekil 5.7, Yapı 3,  $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$  masatepe yapısı için karanlık akım ölçümünü göstermektedir. Sıcaklık arttıkça, karanlık akım değerinin diğer yapılarda olduğu gibi arttığı görüldü. Uygulanan voltaj arttıkça, diğer yapılarla uyum içinde, karanlık akımın arttığı gözlemlendi.

Yapı 1, 2 ve 3'ün karanlık akımları kıyaslandığında, büyüklüklerine göre sıralamanın Yapı 3, Yapı 1 ve Yapı 2 olduğu tespit edildi. Bununla ilgili daha ayrıntılı tartışma “5.4 Yapıların Kıyaslanması” bölümünde sunulmuştur.

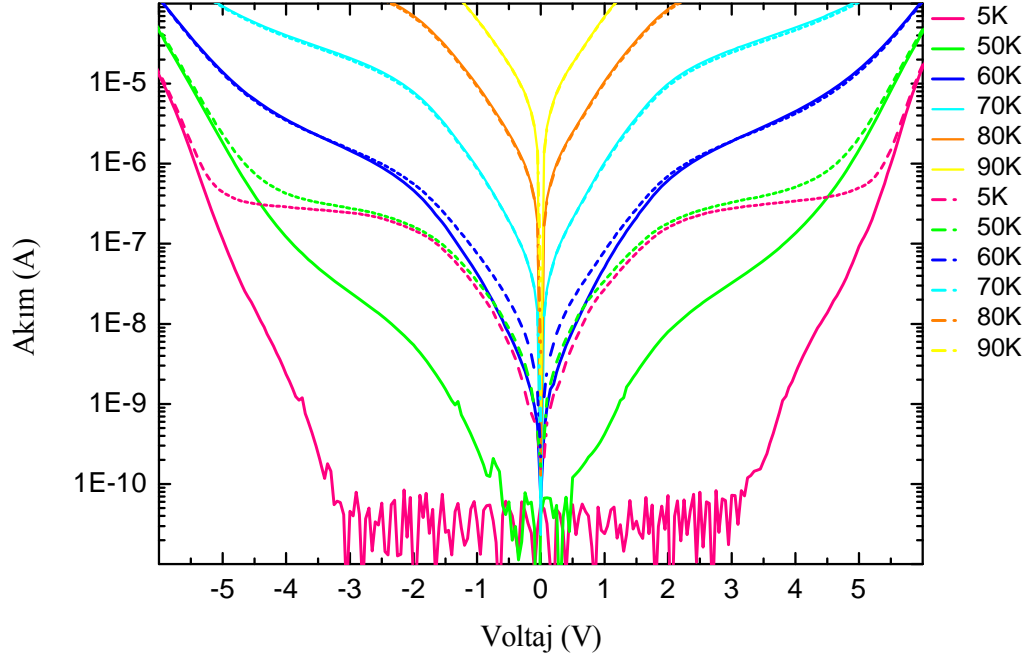


Şekil 5.7. Yapı 3,  $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$  masatepe yapısı için farklı sıcaklıklarda gözlenen karanlık akım-voltaj grafiği

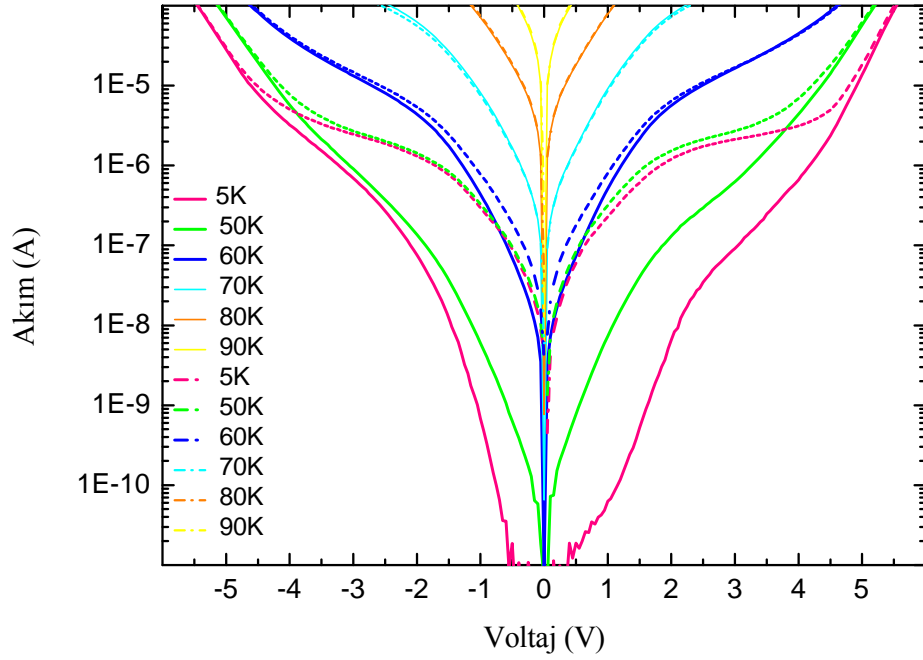
## 5.2. BLIP Sıcaklığı

QWIP'lerin BLIP sıcaklığını belirlemenin yolu, karanlık ortam (radyasyon kalkanı ile) ve aydınlık ortamda (oda sıcaklığına maruz bırakılmış), farklı örnek sıcaklıklarında alınan akım-voltaj eğrilerini kıyaslamaktır. Yapı 1, 2 ve 3 örneklerinden her biri için, karanlık ve aydınlık altında, farklı sıcaklıklardaki grafikler üst üste çizilerek BLIP sıcaklıklarını belirlemek çok daha kolaydır. Grafiklerde karanlık akım düz çizgi ile gösterilirken aydınlık akım kesikli çizgilerle gösterilmiştir.

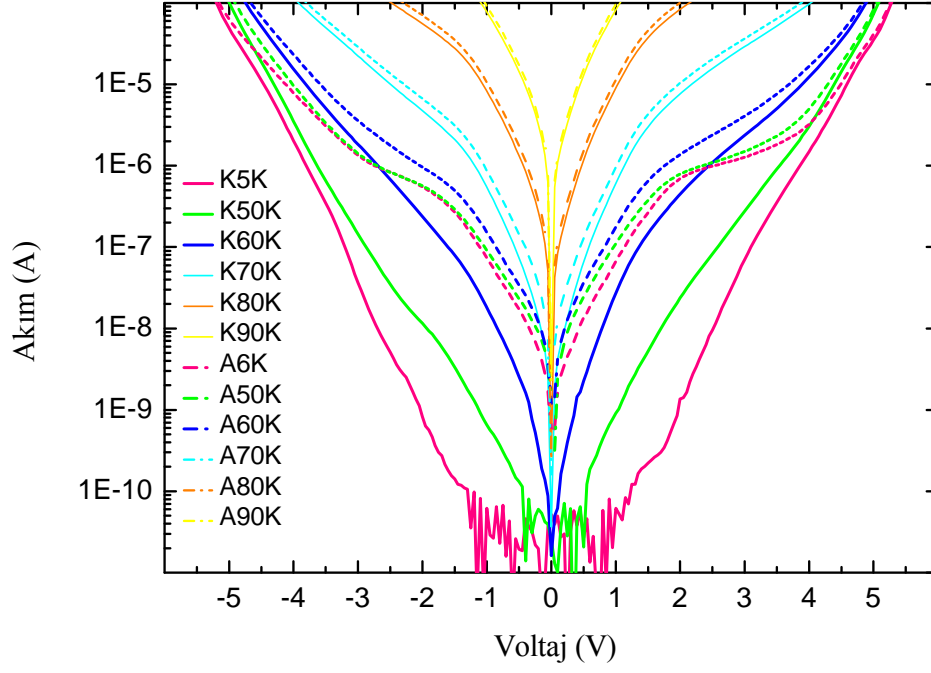
Şekil 5.8-5.9, Yapı 1'in  $400 \times 400$  ve  $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$  masatepe yapıları için karanlık ve aydınlık altındaki akım ölçümlerini göstermektedir. Şekil 5.10, Yapı 2'in  $800 \times 800 \mu\text{m}^2$  masatepe yapısı için ve Şekil 5.11 ise Yapı 3'ün  $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$  masatepe yapıları için karanlık ve aydınlık altındaki akım-voltaj ölçümlerini göstermektedir.



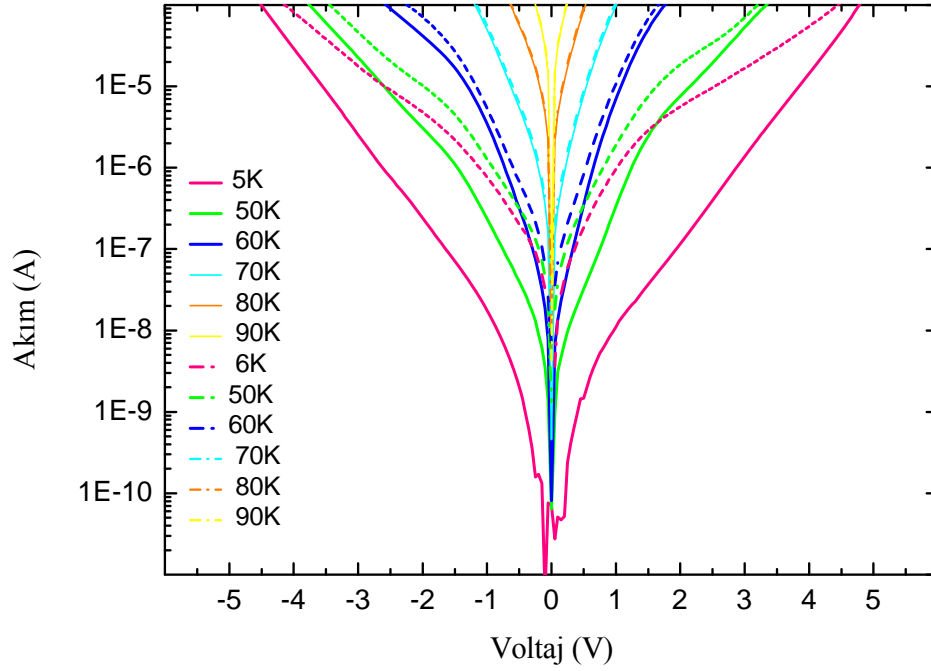
Şekil 5.8. Yapı 1,  $400 \times 400 \mu\text{m}^2$  masatepe yapısı için aydınlık-karanlık akım ölçüm grafikleri, düz çizgiler karanlık akımı gösterirken kesikli çizgiler aydınlık akımı göstermektedir.



Şekil 5.9. Yapı 1,  $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$  masatepe yapısı için aydınlık-karanlık akım ölçümleri, düz çizgiler karanlık akımı gösterirken kesikli çizgiler aydınlık akımı göstermektedir.

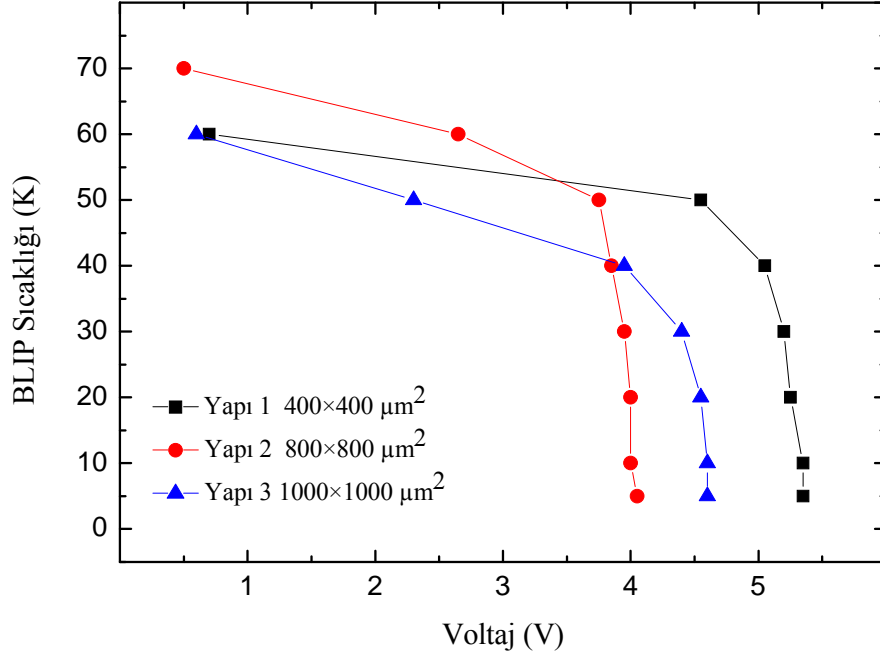


Şekil 5.10. Yapı 2,  $800 \times 800 \mu\text{m}^2$  masatepe yapısı için aydınlık-karanlık akım ölçümleri, düz çizgiler karanlık akımı gösterirken kesikli çizgiler aydınlık akımı göstermektedir.



Şekil 5.11. Yapı 3,  $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$  masatepe yapısı için aydınlık-karanlık akım ölçümleri, düz çizgiler karanlık akımı gösterirken kesikli çizgiler aydınlık akımı göstermektedir.

Yapı 1, 2 ve 3 için algılayıcıların karanlık akım değerinin fotoakıma eşit olduğu sıcaklık (BLIP sıcaklığı) 50-60 K aralığındadır. BLIP sıcaklıklarını daha iyi okuyabilmek ve voltajla değişimini göstermek için aydınlık akımın karanlık akıma oranının sabit 2 tutulduğu ( $I_a/I_k=2$ ) grafik Şekil 5.12’de incelenebilir.



Şekil 5.12. Yapı 1, 2 ve 3'ün voltaja bağlı BLIP sıcaklıklarının kıyaslanması

Voltaj-BLIP sıcaklık grafiği incelendiğinde, düşük voltajlarda (<3,5 V),

$$T_{BLIP\ Yapı\ 2} > T_{BLIP\ Yapı\ 1} > T_{BLIP\ Yapı\ 3}$$

olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, karanlık akım değerlerinin

$$I_{K\ Yapı\ 2} < I_{K\ Yapı\ 1} < I_{K\ Yapı\ 3}$$

şeklinde sıralanmasıdır. Karanlık akımın büyük olması algılayıcıya gelen aydınlık akım değerindeki zayıf sinyallerin okunmasını zorlaştırır. Bu nedenle, zayıf sinyallerin okunabilmesi için algılayıcı daha fazla soğutulmalıdır.

### 5.3. Aktivasyon Enerjisi

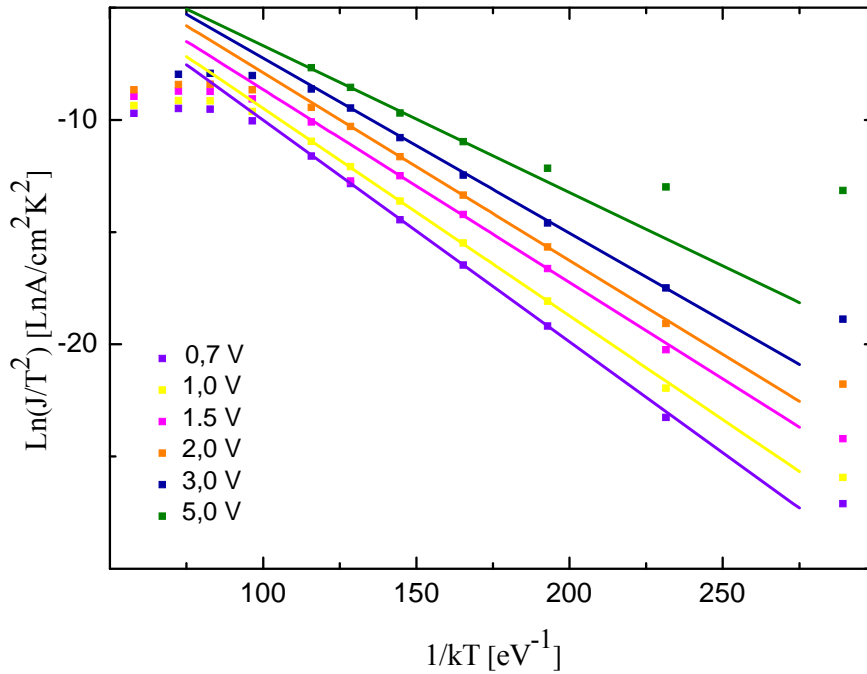
Yapı boyunca akım mekanizmalarının anlaşılması için, örneğin I-V karakteristiği farklı durumlar için incelenmiştir. Termiyonik akım eşitliği kullanılarak aygıtın bariyer yüksekliği bulunabilir (Sze 2007).

$$I=AA^*T^2\exp\left(-\frac{\phi-qV_a}{kT}\right) \quad (5.1)$$

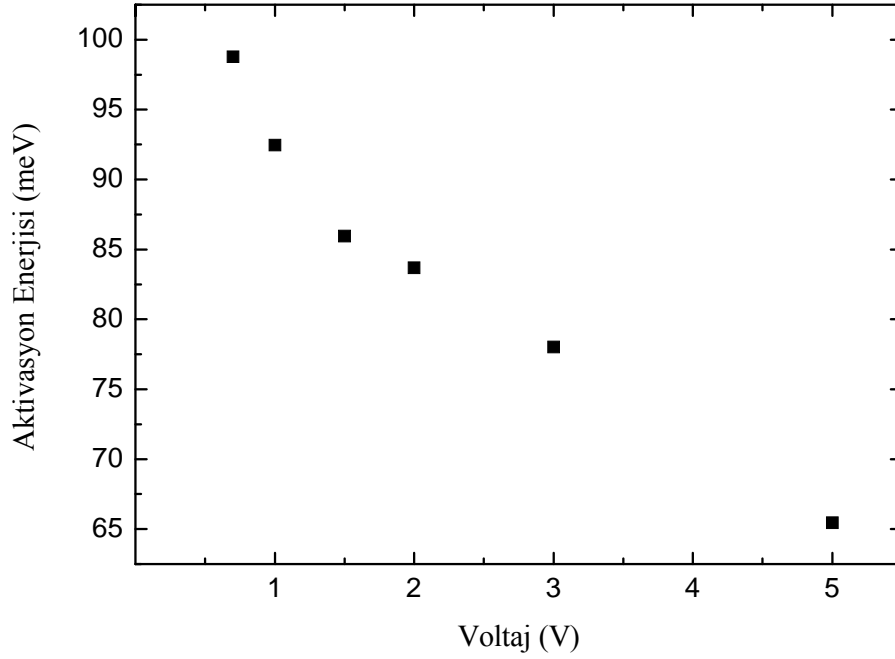
Burada  $A$  aygıtın alanı,  $A^*$  Richardson sabiti,  $V_a$  uygulanan voltajdır.  $\ln(J/T^2)$ 'nin  $1/kT$ 'e göre eğimi aktivasyon enerjisi ( $\Phi-qV_a$ ) ifadesini vermektedir.

Yapı 1, 2 ve 3 yapıda bulunan farklı genişlikteki kuantum kuyularının aktivasyon enerjileri yani dirençleri aynı olacak şekilde tasarlandı.

Şekil 5.13 kullanılarak, Yapı 1 için aktivasyon enerjileri bulundu. Şekil 5.14, aktivasyon enerjisinin voltajla nasıl değiştiğini göstermektedir: Uygulanan voltajın artışı ile taşıyıcı yoğunluğundaki değişimden dolayı, engel yüksekliğinde bir azalma olduğunu göstermektedir (Algün 2008).



Şekil 5.13.Yapı 1'in  $\ln(J/T^2)$ 'nin  $1/kT$  göre grafiğinden aktivasyon enerjileri

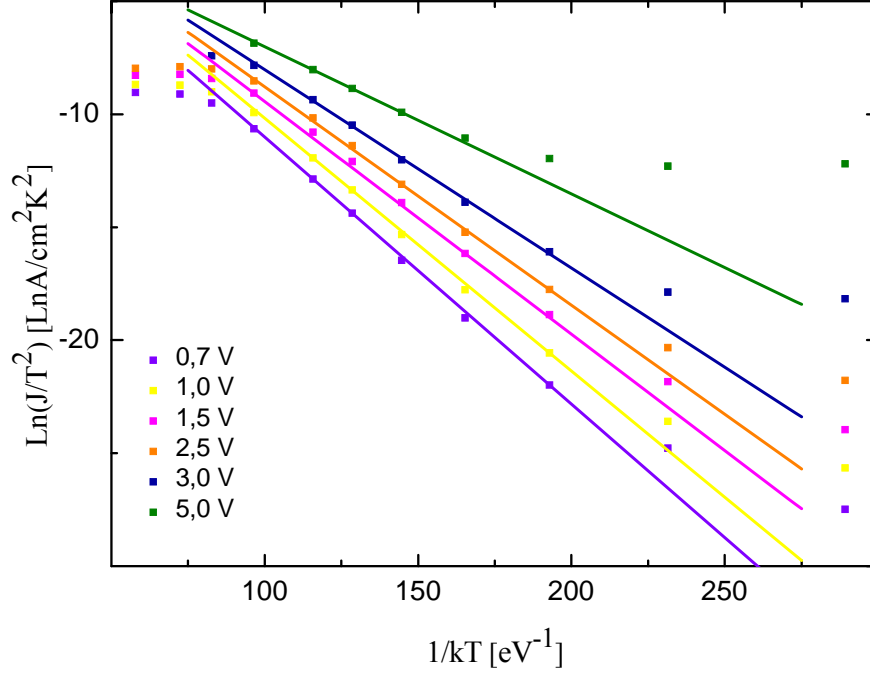


**Şekil 5.14.** Yapı 1 için aktivasyon enerjisinin voltajla ters orantılı olarak değişimini gösteren grafik

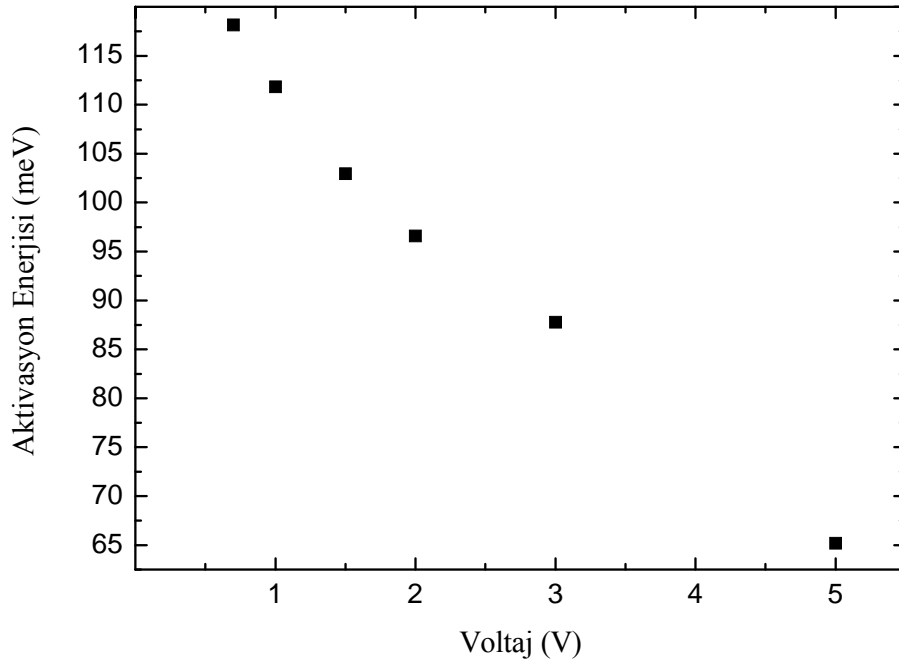
Yapı 1 içindeki 50 ve 60 Å genişliğindeki kuantum kuyularındaki fermi enerjileri sırasıyla 30,5 meV ve 11,4 meV'dir. Çizelge 3.4'den yararlanılarak kuantum kuyularındaki enerji seviyelerinden hesaplanan aktivasyon enerjileri  $[E_c - (E_{1e} + E_f)]$  sırasıyla 128,3 meV ve 117,8 meV'dur. Şekil 5.14'e bakıldığında aktivasyon enerjisinin 0,7 V'da yaklaşık 100 meV olduğu görülmektedir. Deneysel olarak elde edilen aktivasyon enerjisi, yapı içindeki küçük aktivasyon enerjisinin daha baskın olduğu ortalama bir değerdir. Yapı 1 içindeki daha düşük aktivasyon enerjisine sahip 60 Å'luk kuyu sayısının fazla olması, bulunan değerin bu değere daha yakın çıkmasını gerektirmektedir. Deneysel olarak bulunan değerin 0 V'da daha büyük olacağı düşünüldüğünde elde edilen değerlerin teorik olarak hesaplanan değerlerle uyum içinde olduğu görülmektedir.

Yapı 2'deki 50 ve 60 Å genişliğindeki kuantum kuyularındaki elektronun bulunabileceği fermi enerjileri sırasıyla 19,0 meV ve 11,4 meV, aktivasyon enerjileri ise sırasıyla 139,8 ve 117,8 meV'dur. Şekil 4.16'da deneysel sonuçlara bakıldığında aktivasyon enerjisinin 0,7 V'da yaklaşık 120 meV olduğu görülmektedir. Bu değerin daha Yapı 1'e kıyasla daha büyük çıkmasının sebebi; Yapı 2'nin Yapı 1'den farklı olarak hem 50 Å genişliğindeki kuantum kuyularının daha az katkılanmış olması, hem de 60 Å'luk kuyularının sayısının azaltılmış

olmasıdır. Bu durumda, ortalama olarak kendisini gösteren aktivasyon enerjisinin değeri büyümüşür.

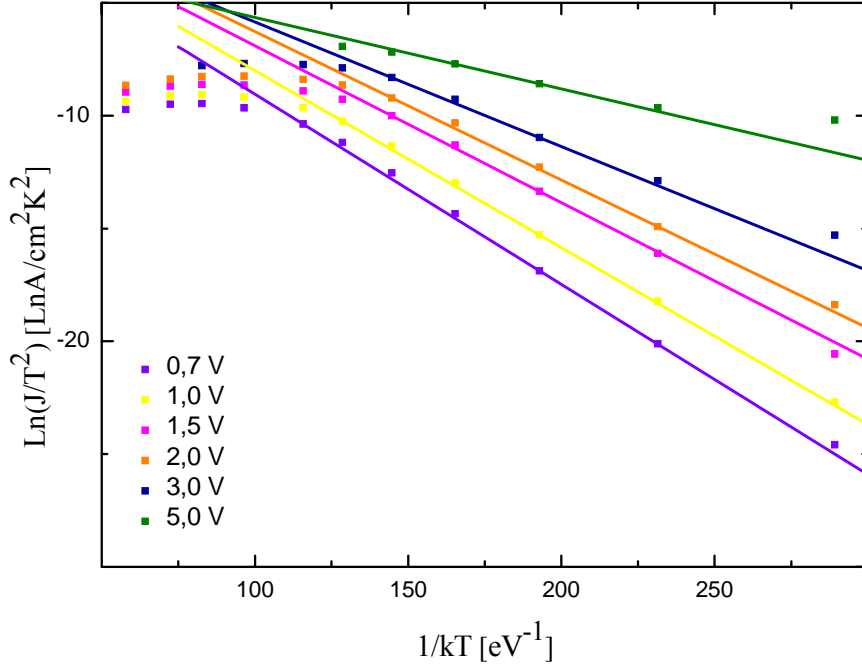


Şekil 5.15.Yapı 2'in  $\ln(J/T^2)$ 'nin  $1/kT$  göre grafiğinden aktivasyon enerjileri



Şekil 5.16. Yapı 2 için aktivasyon enerjisinin voltajla ters orantılı olarak değişimi



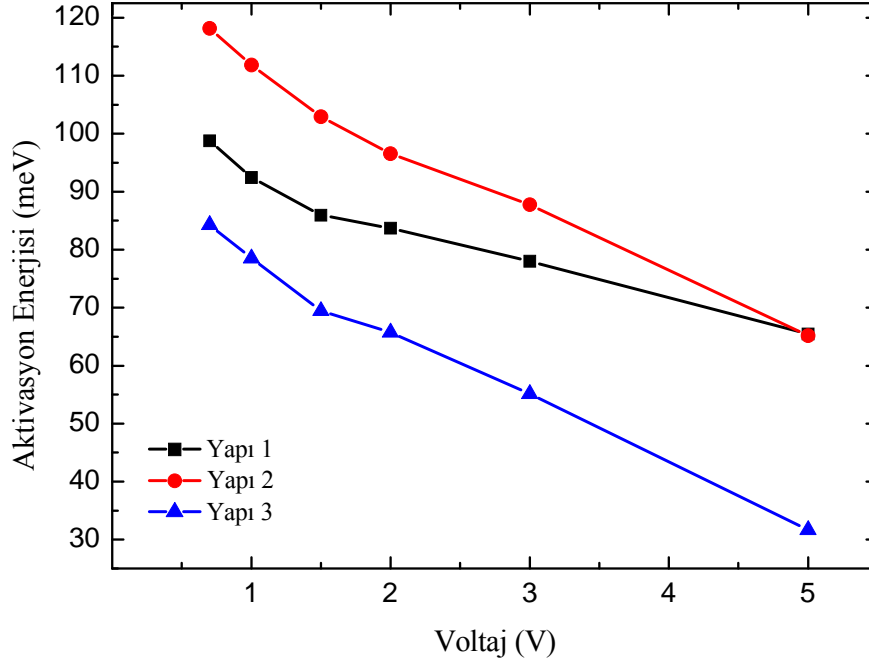


Şekil 5.17.Yapı 3'ün  $\ln(J/T^2)$ 'nin  $1/kT$  göre grafiğinden aktivasyon enerjileri

Yapı 3'teki 50, 60 ve 70 Å genişliğindeki kuantum kuyularında elektronun bulunabileceği fermi enerjileri sırasıyla 30,5, 19,0 ve 11,4 meV ve buna karşılık gelen aktivasyon enerjileri sırasıyla 128,3, 110,2 ve 92,5 meV'dur. Deneysel olarak bulunan aktivasyon enerjisi 0,7 V'da yaklaşık 85 meV'dur (Şekil 5.18). Diğer örneklerde de olduğu gibi, 0 V'da bu değer daha büyük olacağı düşünüldüğünde, bulunan değer beklenen değerle uyumlu olduğu görülmektedir.

Yapı 1, 2 ve 3'e karşılık gelen aktivasyon enerjileri düşük voltaj değerlerinde kıyasladığımızda (Şekil 5.18), Yapı 2'nin en büyük ve ardından Yapı 1 ve 3 geldiğini gördük. Yapı 3'ün, 70 Å genişliğindeki kuantum kuyularına sahip olması ve 70 Å genişliğindeki kuyunun en az aktivasyon enerjisine sahip olması Yapı 3'ün aktivasyon enerjisi en düşük kılmaktadır. Yapı 1'deki 50 Å genişliğindeki kuyuların katkısı Yapı 2'deki 50 Å genişliğindeki kuyuların katkısından daha fazladır. Katkının fazla olması fermi enerjisinin daha fazla olmasını, bu da aktivasyon enerjisinin daha düşük olmasını getirir. Böylece Şekil 5.18'de görüldüğü gibi Yapı 1'in aktivasyon enerjisinin Yapı 2'ninkine göre daha az olması beklenen bir sonuçtur.

Aktivasyon enerjisi algılayıcının tepki verdiği dalgaboyu ile ters orantılıdır. Bu durumda, Yapı 3, tayfta daha büyük dalgaboyuna tepki verirken, arkasında daha kısa dalgalara tepki veren Yapı 1 ve Yapı 2 gelmektedir.

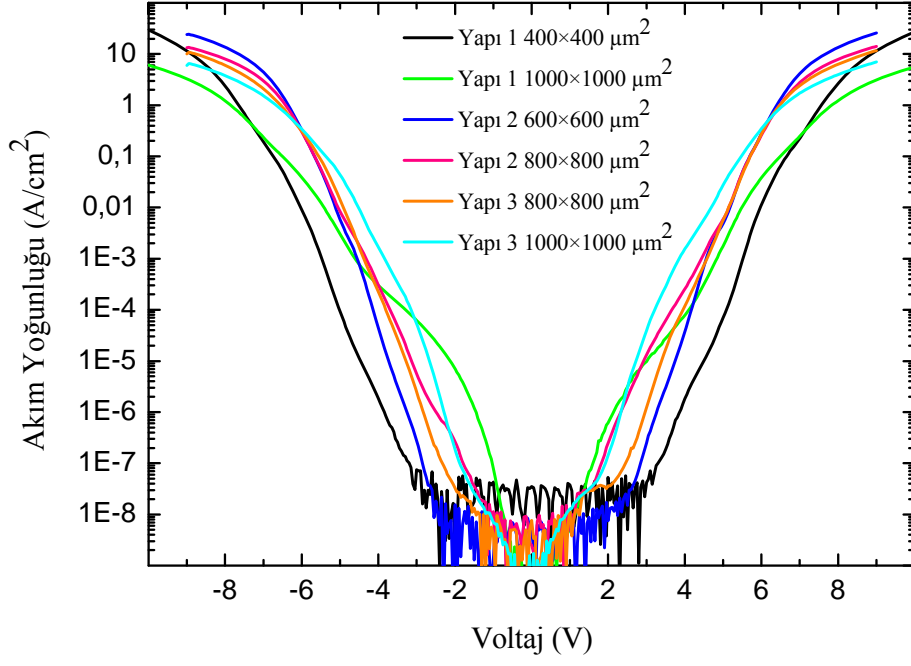


Şekil 5.18. Yapı 1, 2 ve 3'ün aktivasyon enerjilerinin kıyaslanması

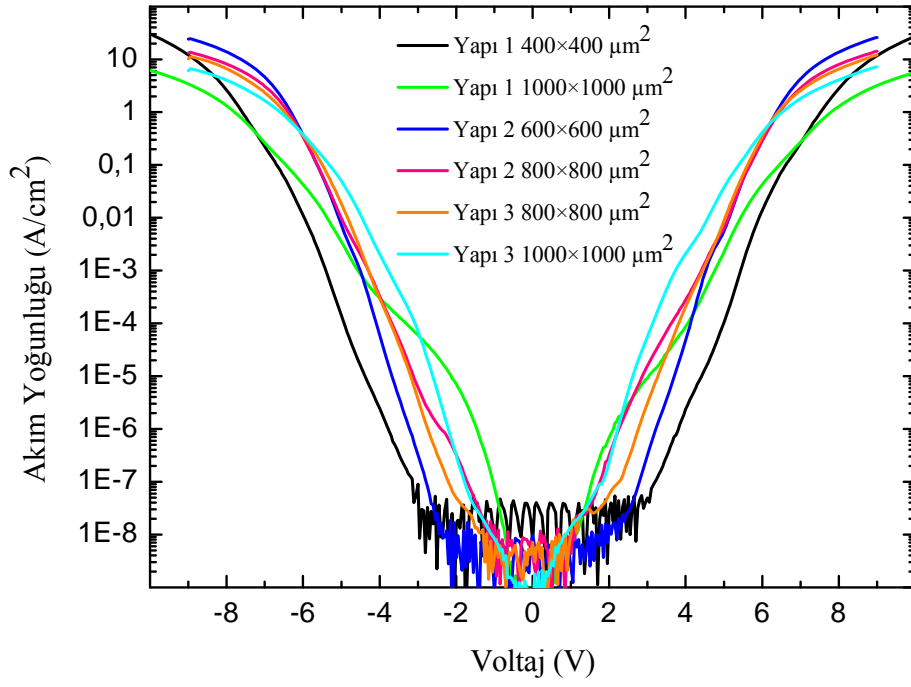
#### 5.4. Yapıların Kıyaslaması

Büyütülen yapılar, birbiriyle ilişkili bir set halinde tasarlandığı için yapıları kendi arasında kıyaslamak akış mekanizmalarını anlamak için faydalı olacaktır. Farklı sıcaklıklarda, üç yapının akım yoğunluğu-voltaj grafikleri Şekil 5.19-5.25'de karşılaştırılmıştır.

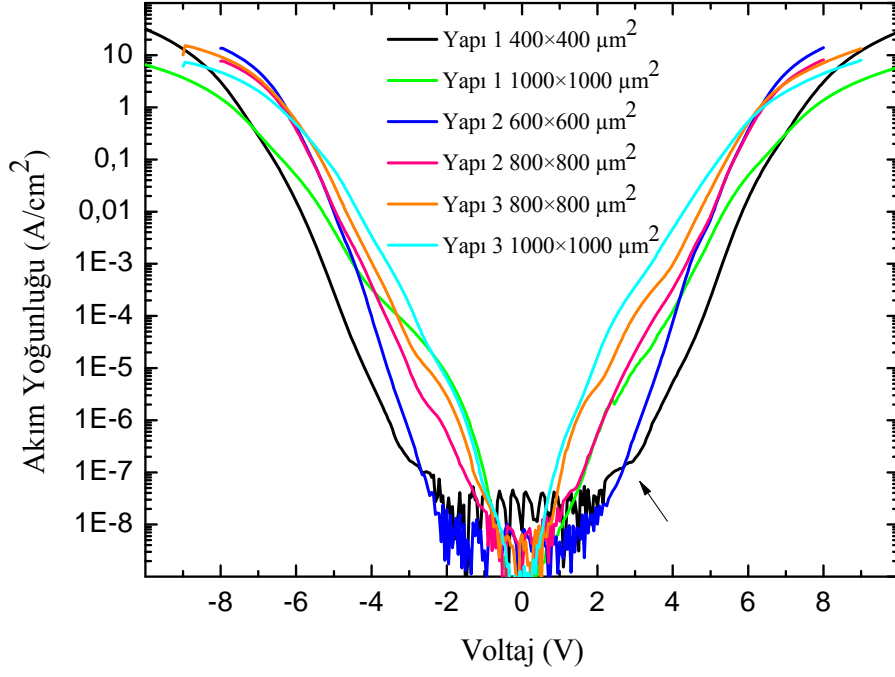
Yapı 1, 2 ve 3 masatepelerinin boyutlarının farklı oluşundan dolayı akım-voltaj grafiklerini yorumlamak zor olacağından, akım yoğunluğu-voltaj grafikleri tercih edilmiştir.



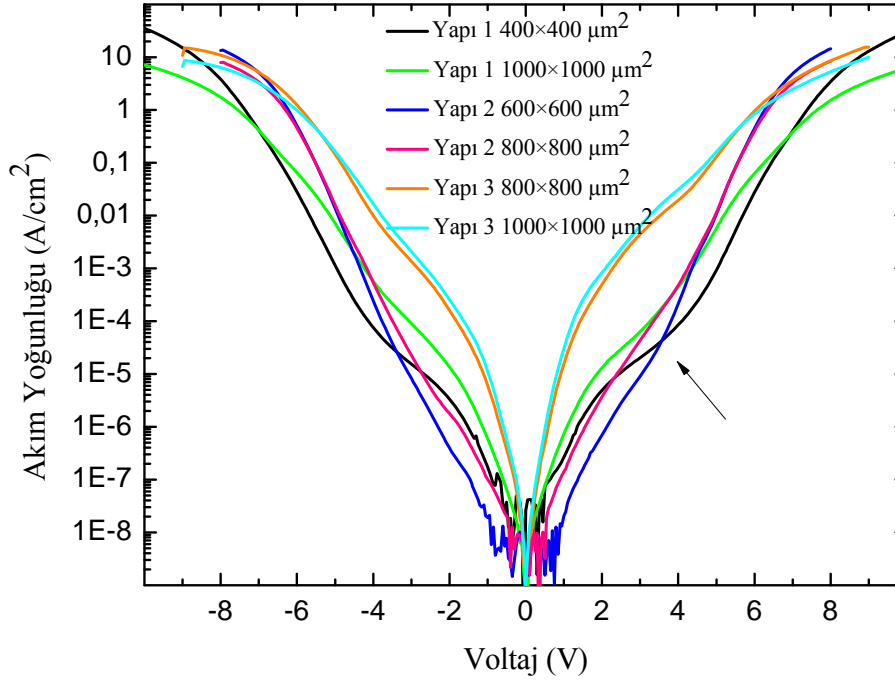
Şekil 5.19. Yapı 1, 2 ve 3 için 20 K’de akım yoğunluğu-voltaj grafikleri



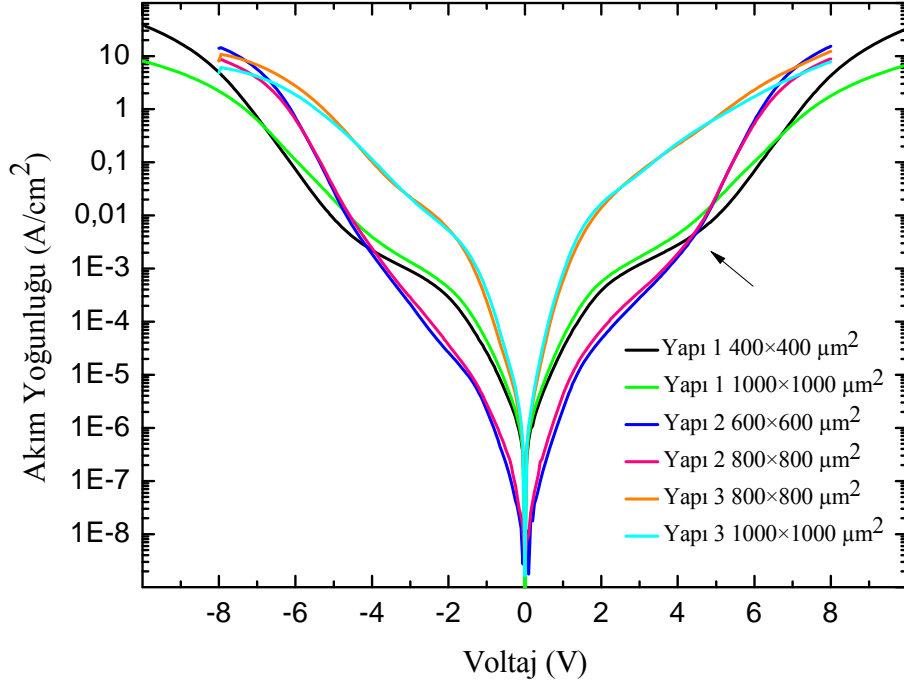
Şekil 5.20. Yapı 1, 2 ve 3 için 30 K’de akım yoğunluğu-voltaj grafiklerinin kıyaslanması



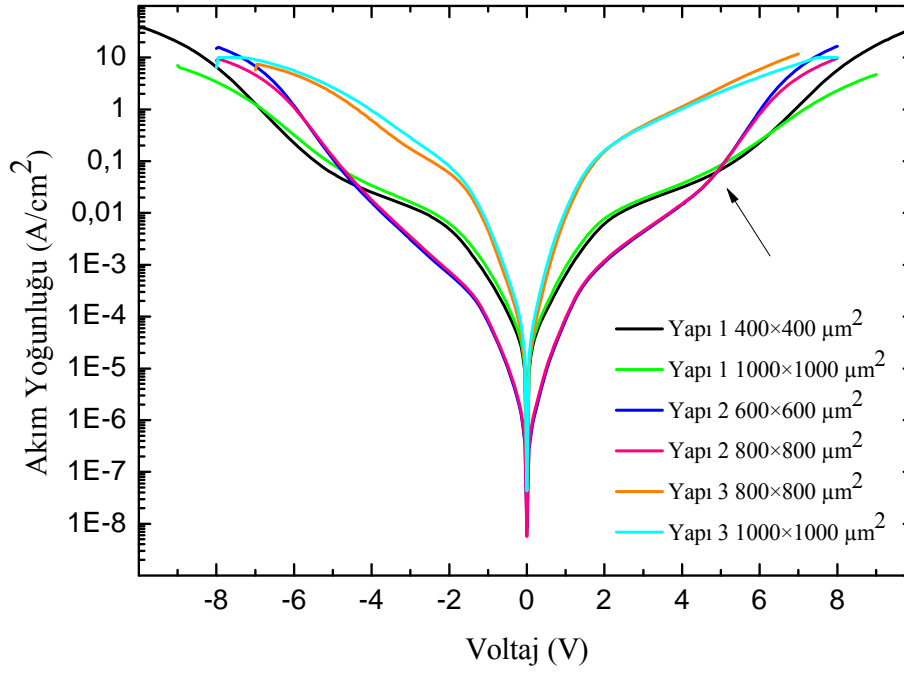
Şekil 5.21. Yapı 1, 2 ve 3 için 40 K’de akım yoğunluğu-voltaj grafiklerinin kıyaslanması



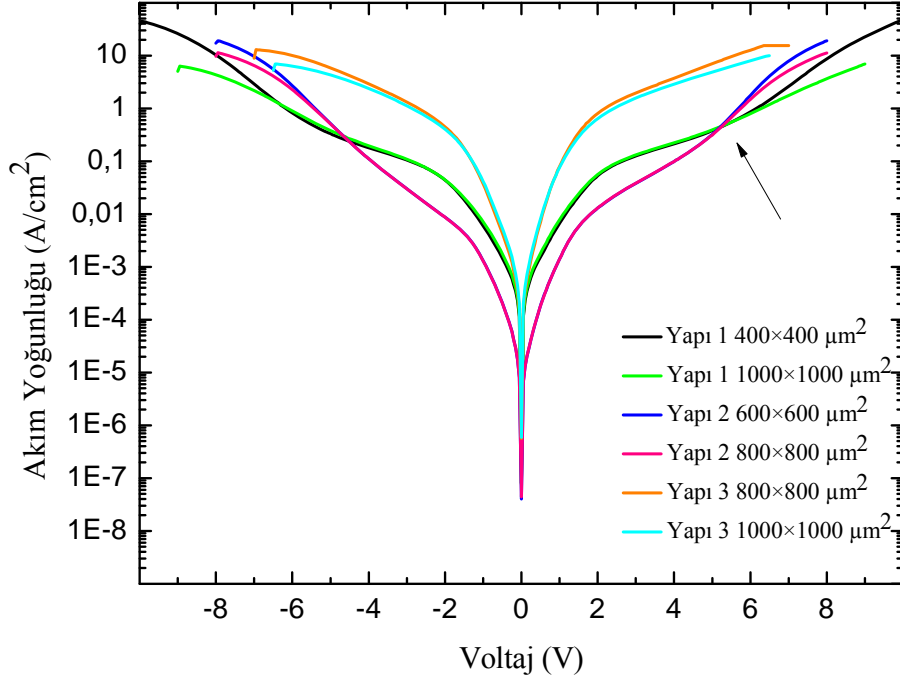
Şekil 5.22. Yapı 1, 2 ve 3 için 50 K’de akım yoğunluğu-voltaj grafiklerinin kıyaslanması



Şekil 5.23. Yapı 1, 2 ve 3 için 60 K’de akım yoğunluğu-voltaj grafiklerinin kıyaslanması



Şekil 5.24. Yapı 1, 2 ve 3 için 70 K’de akım yoğunluğu-voltaj grafiklerinin kıyaslanması



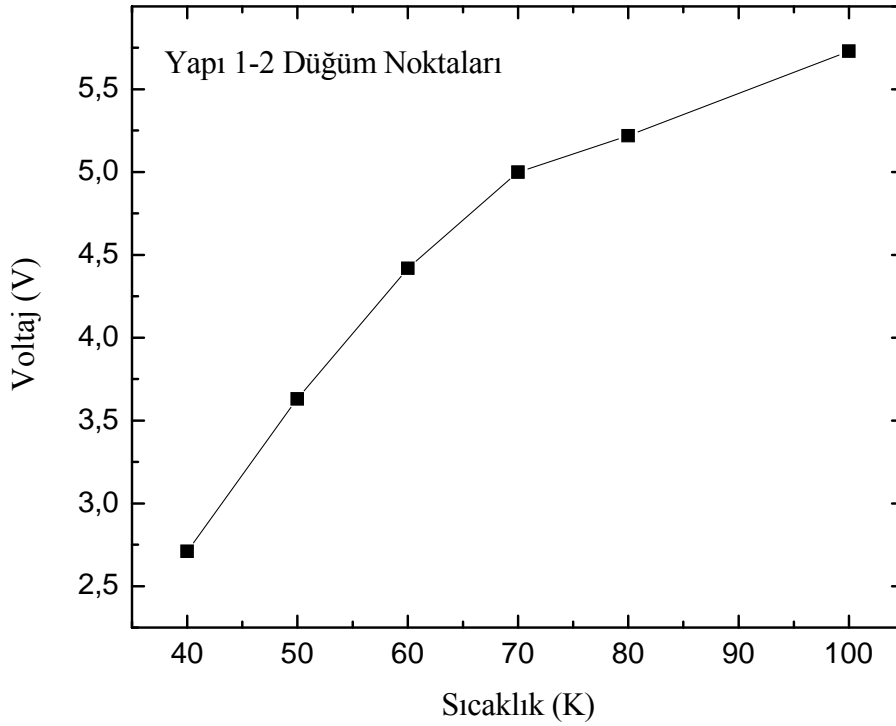
Şekil 5.25. Yapı 1, 2 ve 3 için 80 K’de akım yoğunluğu-voltaj grafiklerinin kıyaslanması

Şekil 5.19 ve Şekil 5.20’e bakıldığında, 20 K ve 30 K sıcaklıklarında akım yoğunluklarının yapıya bağlı olarak sistematik net bir düzen içinde değişmediği gözlenmektedir. Bunun sebebi, düşük sıcaklıklarda baskın akım mekanizmasının tünelleme akımı olmasıdır. Ölçüm yapılan sıcaklıklarda, taşıyıcıların ısı enerjileri aktivasyon enerjilerini yenecek mertebede olmadığından akım, kusurlardan ve yüksek voltaj altında da eğilen bariyerlerden tünelleme yaparak akmaktadır. Sıcaklığın artmasıyla termiyonik akım mekanizmasının etkin olması ve aktivasyon enerjileri düşünüldüğünde, yapıların akım yoğunlukları arasında

$$J_{Yapı 3} > J_{Yapı 1} > J_{Yapı 2}$$

şeklinde ilişki olması beklenmektedir: Aktivasyon enerjisi düşük olan yapıdan geçen akım, büyük olan yapıya kıyasla daha fazladır. Şekil 5.21-5.25’ya bakıldığında, bu sıralamanın Yapı 3 için her zaman, Yapı 1 ve Yapı 2 için düşük voltaj değerlerinde doğru olduğu görülmektedir. 40 K ve üzerindeki sıcaklıklarda bu sıralama, Yapı 1 ve Yapı 2 için farklı voltaj bölgelerinde değişiklik göstermektedir. 40 K sıcaklığında (Şekil 5.21) yaklaşık 3 V’a kadar Yapı 1 daha

yüksek akım yoğunluğuna sahipken, 3 V ve üzeri sıcaklıklarda Yapı 2 daha yüksek akım yoğunluğuna sahiptir. Sıcaklık arttıkça (>40K), Yapı 1 ve 2 ölçümlerindeki bu kesişim (ya da düğüm) noktası daha yüksek voltaj değerlerine doğru kaymaktadır. Voltajın uygulandığı alt ve üst kontak bölgeler arasında kalan büyütülmüş bölgenin kalınlığı, Yapı 1’de Yapı 2’e kıyasla daha fazladır. Dolayısıyla, bu iki yapıya eşit voltaj uygulandığında, birim uzunluk başına düşen voltaj değişimi en fazla Yapı 2’de olmaktadır. Bu durumda, aynı voltaj değerinde (>40K için) Yapı 2’nin Yapı 1’e göre daha yüksek akım yoğunluğuna sahip olması gerekmektedir ve bu etki yüksek voltaj değerlerinde kendisini göstermektedir. Bu iki mekanizmanın kendisini gösterdiği düğüm noktasının sıcaklığa bağlı olarak değişimi Şekil 5.26’da verilmiştir. Sıcaklık arttıkça düğüm noktaları yüksek voltaj değerlerine kaymaktadır. Yapı 1’in etkin aktivasyon enerjisinin daha küçük olması, sıcaklık arttıkça termionik akım mekanizmasının etkisinin daha baskın olmasına ve dolayısıyla birim uzunluğa düşen voltajın etkisinin daha büyük voltaj değerlerinde görünmesine sebep olmaktadır.



Şekil 5.26. Yapı 1 ve 2’nin düğüm noktaları voltaj değerlerinin sıcaklığa bağlı grafiği

## 6. GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As ALGILAYICILARIN FOTOTEPKİSİNİN ÖLÇÜLMESİ

Bu bölümde, tasarlanan ve büyütülen Yapı 1, 2 ve 3'ün fototepki ölçümleri yorumlanacaktır. Fototepki ölçümlerinin tümü, aygıt yüzeyine dik gelen ışık kullanılarak yapılmıştır.

### 6.1. GaAs/AlGaAs Çoklu Algılayıcılarında Fototepkinin Ölçülmesi

8-12 µm atmosfer penceresinde çalışması için tasarlanan Yapı 1, 2 ve 3'ün geniş bant fototepki ölçümleri, Bruker Equinox 55 FTIR cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.8.). Bölüm 3.7'de bahsedildiği gibi, yük direnci kullanılarak yapılan ölçümlerde, Yapı 1 için aygıt üzerine düşen voltaj ve geçen akım değerleri Çizelge 6.1'de verilmektedir.

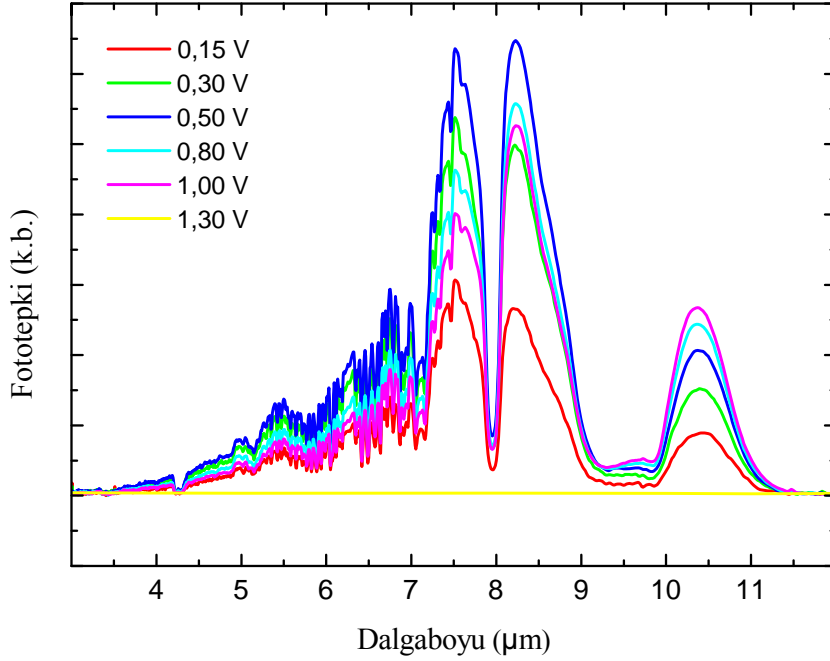
**Çizelge 6.1.** Fototepki ölçümlerinde Yapı 1, 1000×1000 µm<sup>2</sup> masatepe için uygulanan voltaja bağlı olarak elde edilen akım değerleri

<b>YAPI 1 1000×1000 µm<sup>2</sup> Masatepe</b>	
<b>Aygıt Uygulanan Voltaj (V)</b>	<b>Aygıttan Okunan Akım Değerleri (mA)</b>
0,080	1,164
0,154	2,380
0,288	4,953
0,497	10,668
0,803	28,061
1,003	49,369
1,270	94,259

Yapı 1, 50 ve 60 Å genişliğindeki kuantum kuyularının ardışık tekrarından oluşmakta ve enerji hesapları, tepe algı dalgaboylarının sırasıyla 7,8 ve 9,6 µm olması gerektiğini göstermektedir. Şekil 6.1, Yapı 1'in 80 K'de voltaj bağımlı fototepki ölçümlerini göstermektedir. Yapı 1, 5–11 µm dalgaboyu aralığında tepki vermektedir. Büyük dalgaboylarındaki fototepki sinyali, yapının kesim dalgaboyu hakkında bilgi verirken, küçük dalgaboylarındaki (büyük enerji)



azalma özgür taşıyıcı soğurmasından kaynaklanmaktadır. Yapılan ölçümlerde en yüksek fototepki değeri aygıt üzerine 0,5 V voltaj uygulandığında elde edilmiştir. Uygulanan voltaj 1 V üzerine çıktığında, fototepki sinyalinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 6.1. Yapı 1'in voltaja bağlı fototepki ölçümleri

Diğer örneklerin fototepki tayflarında da görüldüğü gibi 8 µm civarında ve 9-10 µm arasında fototepki olmadığı görülmüştür. Bunun sebebi, yapıların bu bölgelerde tepkisinin olmaması değil, bu dalgaboylarında ışığın örneğe ulaşmamasıdır. Atmosferin bu bölgede güçlü soğurma etkisine sahiptir (Şekil 2.6). Su buharı (H<sub>2</sub>O), metan (CH<sub>4</sub>) ve azot oksit (N<sub>2</sub>O) 8 µm bölgesinde, oksijen (O<sub>2</sub>) ve ozon (O<sub>3</sub>) ise 9-10 µm arasında yüksek soğurmaya sahiptir. Fototepki ölçümleri atmosfer ortamında yapıldığından ve atmosferin soğurmasından dolayı bu bölgede sinyaller düşük şiddette görülmektedir.

Atmosferik etkilerin ortadan kaldırılması için vakum ortamında ölçüm yapmak bir yöntemdir. Diğer bir yöntem algılayıcının fototepki sinyalinin artırılmasıdır. Böylece atmosferik soğurmanın fototepki tayfına etkisi görece olarak azaltılabilir. Algılayıcıdaki sinyalin artırılmasının bir yolu ışığı algılayıcıya 45°'lik açıyla göndermek veya masatepe yapılarının üzerinde kırınım ızgaraları oluşturmaktır (Liu ve Capasso 2000). Gönderilen ışığın kuantum kuyuları

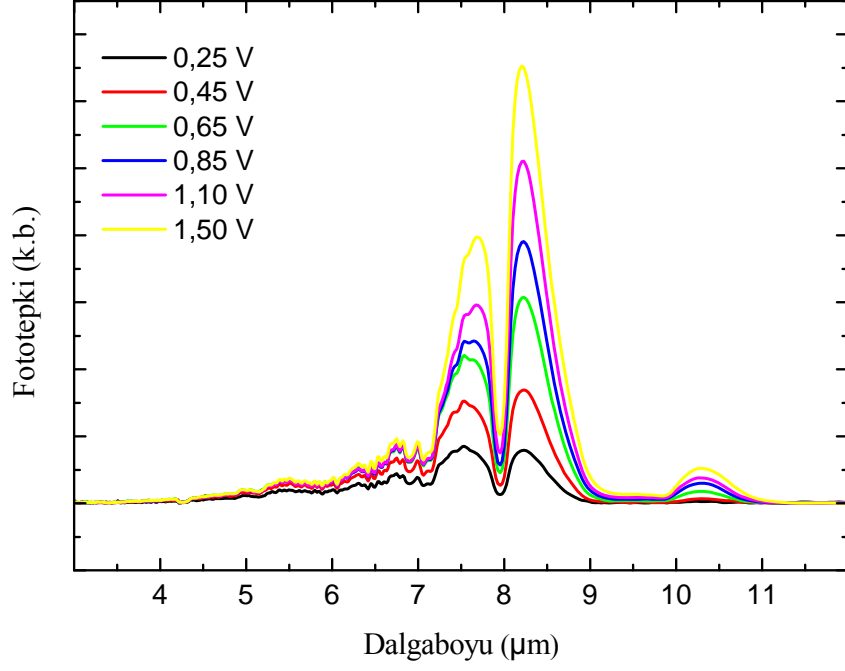
tarafından algılanabilmesi için büyütme doğrultusunda ışığın elektrik alan vektörü bileşeninin olması gerekmektedir. Ölçümlerimizde ışık yüzeye dik gönderildiği için aslında sadece saçılmalara uğrayan ışık, soğurulma koşullarını sağlamakta ve bu da gönderilen ışığın çok az bir kısmını kapsamaktadır. Algılayıcının sinyalini arttırmanın başka bir yolu da algılayıcının iyi verimle çalıştığı BLIP sıcaklığında ölçüm almaktır. Ölçümlerimizde 80 K sıcaklığı kullanılmıştır. Oysa Şekil 5.12 incelendiğinde, bu yapılar için en uygun çalışma sıcaklıklarının, yaklaşık 0,5 V voltaj altında, 60-70 K aralığı olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumda, bu ölçümlerin 60 K veya daha düşük bir sıcaklıkta yapılması, fototepki sinyalinin artmasını sağlayacak ve atmosferik soğurma etkisinin daha az görünmesine neden olacaktır.

Benzer şekilde Yapı 2’de 50 ve 60 Å genişliğindeki kuantum kuyularından oluşmaktadır. Yapı 2’nin fototepki ölçümlerinde uygulanan voltaja bağlı olarak elde edilen akım değerleri Çizelge 6.2’de verilmektedir.

**Çizelge 6.2.** Fototepki ölçümlerinde Yapı 2,  $800 \times 800 \mu\text{m}^2$  masatepe için uygulanan voltaja bağlı olarak elde edilen akım değerleri

<b>YAPI 2 <math>800 \times 800 \mu\text{m}^2</math> Masatepe</b>	
<b>Aygıtta Uygulanan Voltaj (V)</b>	<b>Aygıttan Okunan Akım Değerleri (<math>\mu\text{A}</math>)</b>
0,272	0,270
0,434	0,635
0,636	1,560
0,844	3,483
1,104	8,756
1,482	24,593
1,767	41,341
2,009	58,517
2,472	102,813
2,820	148,200
3,191	213,000
4,007	478,300
-1,157	-8,140
-1,706	-22,300
-2,140	-37,630

Şekil 6.2, Yapı 2’in 80 K’de voltaja bağımlı fototepki ölçümlerini göstermektedir. Yapı 2, Yapı 1’le benzer özellik göstermekle birlikte en yüksek fototepki değerine, yapıya 1,5 V uygulandığında ulaşılmıştır.



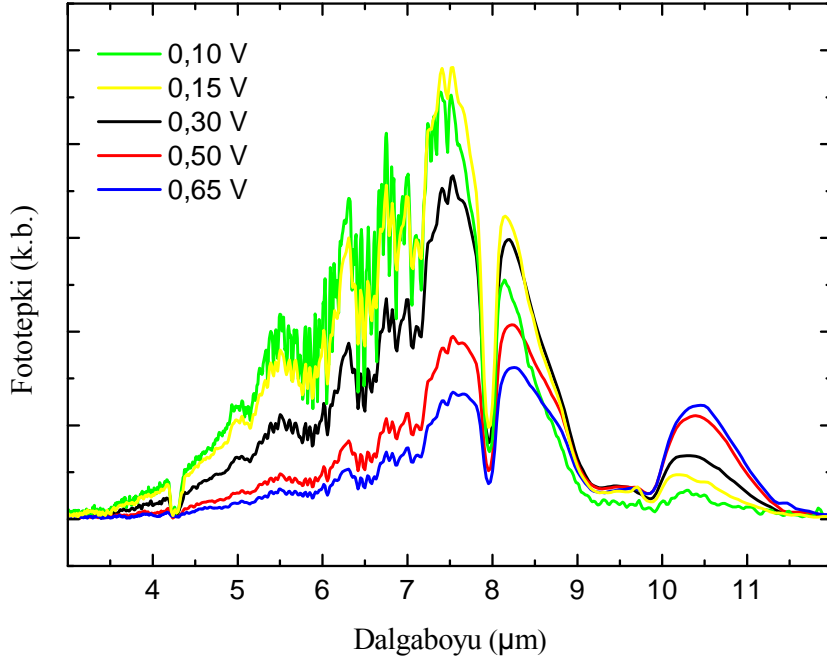
Şekil 6.2. Yapı 2'nin voltaja bağlı fototepeki ölçümleri

Yapı 3, Yapı 1 ve 2'den farklı olarak 70 Å genişliğindeki kuantum kuyularını da içermekte ve 70 Å kuantum kuyunun kesim dalgaboyu 11,9 μm olarak hesaplanmıştır. Yapı 3'ün fototepeki ölçümlerinde uygulanan voltaja bağımlı olarak elde edilen akım değerleri Çizelge 6.3'de verilmektedir.

Çizelge 6.3. Fototepeki ölçümlerinde Yapı 3, 1000×1000 μm<sup>2</sup> masatepe için uygulanan voltaja bağlı olarak elde edilen akım değerleri

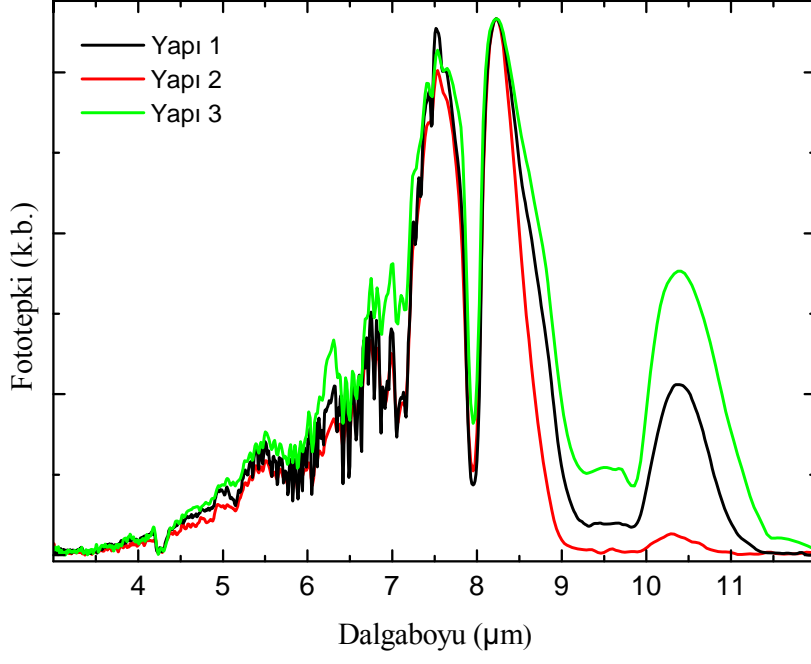
<b>YAPI 3- 1000×1000 μm<sup>2</sup> Masatepe</b>	
<b>Aygıtta Uygulanan Voltaj (V)</b>	<b>Aygıttan Okunan Akım Değeri (mA)</b>
0,080	1,922
0,157	4,285
0,285	11,759
0,499	45,539
0,630	96,567
-0,080	-1,822
-0,159	-4,264
-0,285	-10,305
-0,499	-28,576
-0,630	-49,589
-0,795	-98,858

Şekil 6.3, Yapı 3'ün 80 K'de voltaja bağlı fototepki ölçümlerini göstermektedir. Yapı 3, 0,15 V uygulandığında 7-9  $\mu\text{m}$  arasında ve 0,65 V uygulandığında 10-11  $\mu\text{m}$  arasında daha iyi tepki vermektedir.



Şekil 6.3. Yapı 3'ün voltaja bağlı fototepki ölçümleri

Şekil 6.4, Yapı 1, 2 ve 3'ün fototepki ölçümlerinin normalize edilmiş grafiklerini göstermektedir. Her üç yapının fototepki ölçümlerinin daha rahat karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla bu grafik sunulmuştur. Şekil 6.4'te Yapı 1, 2 ve 3 kıyaslandığında, 10-11  $\mu\text{m}$  bölgesinde Yapı 3'ün en yüksek tepkiyi verdiği görüldü. Bunun sebebi, 10-11  $\mu\text{m}$  bölgesine karşılık gelen 70 Å genişliğindeki kuantum kuyularının Yapı 3 içerisinde bulunmasından kaynaklanmaktadır. Bu bölgede Yapı 1'in tepkisinin Yapı 2'ye göre daha fazla olmasındaki neden ise Yapı 1'in Yapı 2'ye göre daha fazla 60 Å'luk kuantum kuyusu içermesidir.



Şekil 6.4. Sabit voltaj altında, Yapı 1, 2 ve 3'ün 80 K fototepeki ölçümlerinin kıyaslanması

## 7. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, 7-12  $\mu\text{m}$  tayf bölgesini algılayabilen GaAs/AlGaAs kuantum kuyu kızılötesi foto algılayıcı olarak tasarlanan yapılar araştırılmıştır. Cihaz haline getirilen yapılar çeşitli ölçüm metotları kullanılarak karakterize edilmiştir: akım-voltaj (I-V), sıcaklık / voltaj bağımlı fotoluminesans (PL) ve fototepki (PR) ölçümleri.

Voltaj ve sıcaklık bağımlı PL ölçümleri, yapının kuantum kuyularındaki enerji seviyelerinin belirlenmesinde kullanıldı. Geçiş enerjileri yapı içerisindeki kuyu genişliklerini, kuyudaki katkı miktarlarını ve bariyerlerdeki konsantrasyonları karşılaştırmamıza ve bilgi edinmemize yardımcı oldu. Büyütülen yapı parametreleriyle deneysel bulgular uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir.

Aynı yapıya ait farklı büyüklüklerde masatepenin akım-voltaj karakteristikleri; aynı akım yoğunlukları ile sonuçlanmış bu da hem büyütülen yapıların hem de yapılan aygıt üretme işlemlerinin düzgün olduğunun göstergesidir. Yapı 1, 2 ve 3'ün karanlık ve aydınlık altındaki akım-voltaj grafikleri incelenmiş buradan algılayıcılar için önemli bir parametre olan BLIP sıcaklıkları (düşük voltaj değerlerinde,  $<3\text{V}$ ) yapı 2 > Yapı 1 > Yapı 3 olduğu görülmektedir. Buradan, üretilen Yapı 2 algılayıcısının çalışma sıcaklığının diğer iki yapıya göre yüksek sıcaklıklarda olduğu görülmüştür. Akım-sıcaklık grafiklerinden aktivasyon enerjilerin 0,5 V için Yapı 2 > Yapı 1 > Yapı 3 olduğu görülmektedir. Yapı 1 ve Yapı 2 karanlık akım mekanizması olarak incelendiğinde, karanlık akımda baskınlık gösteren parametreler arasında yapının kalınlığı ve kuantum kuyu sayısı olduğu söylenebilir.

Bütün yapılar tasarlandığı gibi 7-12  $\mu\text{m}$  bölgesinde foto-tepki vermektedir. Daha geniş kuyu genişliğine sahip olan yapı, beklenildiği gibi daha büyük dalgaboyları için daha fazla tepki vermektedir. Bütün yapılar 8  $\mu\text{m}$  ve 9-10  $\mu\text{m}$  arasındaki bölgede foto-tepkiden yoksundur. Bunun sebebi, yapıların bu bölgelerde tepkisinin olmaması değil, bu dalgaboylarında ışığın örneğe ulaşmamasıdır. Bunun nedeni, atmosferin bu bölgede güçlü soğurma etkisine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Su buharı ( $\text{H}_2\text{O}$ ), metan ( $\text{CH}_4$ ) ve azot oksit

(N<sub>2</sub>O) 8 µm bölgesinde, oksijen (O<sub>2</sub>) ve ozon (O<sub>3</sub>) 9-10 µm bölgesi arasında yüksek soğurmaya sahiptir. Algılayıcının algıladığı bölgenin tam olarak anlaşılması için, fototepki ölçümlerinde atmosferin soğurma etkisinin ortadan kaldırılması için vakum ortamında ölçümler alınabilir.

Yapıların voltaj altındaki foto tepkisine bakıldığında, Yapı 1'in 0,5 V'da, Yapı 2'nin 1,50 V'da, Yapı 3'ün 0,15 V'da daha verimli çalıştığı görülmektedir.

Fototepki ölçümlerindeki sinyali arttırmak için, gelen ışığın algılayıcıya 45° ile gelmesi sağlanabilir. Başka alternatif yol ise; ölçümlerin 60 K veya daha düşük bir sıcaklıkta yapılması, fototepki sinyalinin artmasını sağlayacak ve atmosferik soğurma etkisinin daha az görünmesine neden olacaktır.

## KAYNAKLAR

- Algün, G. (2008), “The Determination of Barrier Height During Vertical Transport in GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub> As Quantum Well Structures”, *Journal of Engineering and Natural Sciences*, **26**, 1-10.
- Aoki, K., Sakamoto, M., Tanigawa, T. (2008), “Photoluminescence and photoconductivity spectra as a function of photoexcitation density in a GaAlAs/GaAs quantum well”, *Physica E*, **40**, 1642-1644.
- Arpapay, B. (2010), *GaAs/AlGaAs Tabanlı Yarıiletkenlerde Aygıt Üretimi ve Karakterizasyonu*, Y. Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Benisty, H., Sotomayor-Torres, C.M. ve Weisbuch, C. (1991), “Intrinsic mechanism for the poor luminescence properties of quantum-box systems”, *Phys. Rev. B*, **44**, 10945-10948.
- Beşikçi, C., Kaldırım M., Eker S.U., Arslan Y. ve Tumkaya U. (2008), “Large Format Voltage Tunable Dual Color Midwavelength Infrared Quantum Well Infrared Photodetector Focal Plane Array”, *IEEE Photonics Technology Letters*, **20**, 709-711.
- Chang, L.L., Esaki, L., Sai-Halaz, G.A. (1977), “Infrared Optical devices of layered structure” IBM Tech. Disc. Bull., **20**, 2019-2020.
- Chui, L.C., Smith, J.S., Margalit, S., Yariv, A. ve Cho, A.Y. (1983), “Application of internal photoemission from quantum-well and heterojunction superlattices to infrared photodetectors”, *Infrared Phys*, **23**, 93-97.
- Coon, D.D. ve Karunasiri, R.P.G.(1984), “New mode of IR detection using quantum wells”, *Appl. Phys. Lett.*, **45**, 649-651.
- Coon, D.D., Karunasiri, R.P.G. ve Liu L.Z. (1985), “Narrow band infrared detection in multi quantum well structures” *Appl. Phys. Lett.*, **47**, 289-291.
- Coon, D.D., Karunasiri, R.P.G. ve Liu H.C. (1986), “Fast response quantum well photodetectors”, *J.Appl.Phys.*, **60**, 2636-2638.



- Dereniak, E.L. ve Boreman, G.D. (1996), *Infrared Detectors and Systems*, A Wiley-Interscience Publication, Canada.
- Donchev, V., Bourgoïn, J.C. ve Bois, P. (2002), "Dark current through GaAs/AlGaAs multiple quantum wells", *Semicond. Sci. Technol.*, **17**, 621-624.
- Esaki, L. ve Sakaki, H. (1977), "New Photoconductor" IBM Tech. Disc. Bull. **20**, 2456.
- Fox, M. (2001), *Optical Properties of Solids*, Oxford University Press, Great Britain.
- Föll, H. (2010), *Materials and Radiant Recombination*, [http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/semi\\_en/index.html](http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/semi_en/index.html)
- Gebbie, H.A., Harding, W.R., Hilsum, C., Pryce, A.W. and Roberts, V. (1951), "Measurements of the Atmospheric Water Vapour Using the Absorption Band at  $7250\text{ cm}^{-1}$ ", *Proc. of the Royal Society A*, **206**, 87-107.
- Gfroerer, H.T. (2000), *Photoluminescence in Analysis of Surfaces and Interfaces*, John Wiley&Sons Ltd, Chichester.
- Goossen, K.W. ve Lyon S.A. (1985), "Grating enhanced quantum well detector", *Appl.Phys.Lett.*, **47**, 1257-1259.
- Goossen, K.W. ve Lyon S.A. (1988), "Performance aspects of a quantum-well detector", *J.Appl.Phys.*, **63**, 5149-5153.
- Gu, Y., Zhan, Y.G., Liu, A.Z., Li, H. (2007), "Optical properties of gas source MBE grown AlInP on GaAs", *Material Science and Engineering B*, **139**, 246-250.
- Gunapala, S.D. ve Bandara S.V. (2000), *Handbook of Thin Film Devices*, Academic Press, A.B.D..
- Harwit, A. ve Harris, J.S. (1987), "Observation of Stark shifts in quantum well intersubband transitions", *Appl. Phys. Lett.*, **50**, 685-689.
- Hegde, S.M., Brown, G.J., Szmulowicz F., Ehret, J. (2001), "Photoluminescence studies of beryllium doped GaAs/AlGaAs quantum wells", *Infrared Physics & Technology*, **42**, 149-155.

- Hirao, T., Hasegawa, T., Nakayama, M. (2008), "Photoluminescence due to exciton-exciton scattering in a GaAs/AlAs multiple quantum well", *Journal of Luminescence*, **128**, 960-962.
- Hook, J.R. ve Hall, H.E. (1999), *Katıhal fiziği*, 1999 Literatür Yayıncılık, İstanbul.
- Hsu, K.C., Ho, C.H., Lin, Y.S., Wu, Y.H., Hsu, R.T., Huang, K.W. (2008), "Optical and electrical characteristics of GaAs/InGaAs quantum-well device", *Journal of Alloys and Compounds*, **471**, 567-569.
- Jelen, C.L. (1998), *Ga<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub>As<sub>y</sub>P<sub>1-y</sub> Based n-type Long Wavelength Quantum Well Infrared Photodetectors: Growth, Characterization and Fabrication*, Doktora Tezi, Northwestern Üniversitesi, Elektrik ve bilgisayar Müh., A.B.D..
- Jones, V. (2001), *Energy Gap*.  
[http://people.seas.harvard.edu/~jones/es154/lectures/lecture\\_2/energy\\_gap/energy\\_gap.html](http://people.seas.harvard.edu/~jones/es154/lectures/lecture_2/energy_gap/energy_gap.html)
- Karakulak, T. (2010), *GaAs/AlGaAs Tabanlı Kuantum Kuyularının TEM (Geçirmeli Elektron Mikroskobu) ile Analizi*, Y. Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Kim, Y. (2006), "Photoluminescence transitions of GaAs/AlGaAs asymmetric double-well structures", *Current Applied Physics*, **6**, 248-251.
- Lenchyshyn, L.C., Liu, H.C., Buchanan, M. ve Wasilewski, Z.R. (1996), "Voltage-tuning in multi-color quantum well infrared photodetector stacks", *J.Appl.Phys.*, **79**, 8091-8097.
- Levine, B.F., Zussman, A., Gunapala, S.D., Asom, M. T., Kuo, J.M. ve Hobson, W.S. (1992), "Photoexcited escape probability, optical gain, and noise in quantum well infrared photodetectors", *J.Apl. Phys.* **72**, 4429-4444.
- Levinshtein, M., Rumyantsev, S., Shur, M. (1996), *Handbook Series on Semiconductor Parameters*, World Scientific Publish, Singapore.
- Liu, H.C., Li, J., Thompson, J.R., Wasilewski, Z.R., Buchanan, M. ve Simmons, J.G. (1993), "Multicolor voltage-tunable quantum-well infrared photodetector", *IEEE Electron. Dev. Lett.*, **14**, 566-568.

- Liu, H.C. ve Capasso F. (2000), *Intersubband Transitions in Quantum Wells: Physics and Device Applications I*, Academic Press, San Diego, A.B.D..
- Liu, H.C. ve Schneider, H. (2006), *Quantum Well Infrared Photodetectors*, Springer Publish, Newyork, A.B.D..
- Liu, H.C. ve ark. (2007),”Designs of Broadband quantum-well infrared photodetectors and 8-12  $\mu\text{m}$  test device results”, *Infrared Physics &Technology*, **50**, 171-176.
- Lloyd, J.M. (1975), *Thermal Imaging Systems*, Plenum Press, New York, A.B.D.
- Martinet, E., Rosencher, E., Luc, F., Bois, Ph., Costard, E. ve Delaitre, S. (1992), “Switchable bicolor (5.5–9.0  $\mu\text{m}$ ) infrared detector using asymmetric GaAs/AlGaAs multiquantum well”, *Appl. Phys. Lett.*, 61, 246-249.
- Mendez, E.E., Bastard, G., Chang, L.L. ve Esaki L. (1982), “Effect of an electric field on the luminescence of GaAs quantum wells”, *Physical Review B*, **26**, 7101-7104.
- McKelvey, J. P. (1966), *Solid State and Semiconductor Physics*, Harper ve Row Press, New York, A.B.D.
- Neaman, A.D., (çev. Sağlam M. ve Ateş A.) (2007), *Yarıiletken Fiziğine Giriş*, Aktif Yayınevi, İstanbul.
- Schneider, H., Walther, M., Schönbein, C., Rehm, R., Fleissner, J., Pletschen, W., Braunstein, J., Koidl, P., Weimann, G., Ziegler, J. ve Cabanski, W. (2000), “QWIP FPAs for high-performance thermal imaging”, *Physica E*, **7**, 101-107.
- Sharma, A. ve Schulman, S. G. (1999), *Introduction to Fluorescence Spectroscopy*, A Wiley-Interscience Publication, New York, U.S.A..
- Singh, J. (1995), *Semiconductor Optoelectronics*, Electrical Engineering Series, Singapore, Chinese.
- Singleton, J. (2001), *Band Theory and Electronic Properties of Solids*, Oxford University Press, Britain.
- Smith, J.S., Chui, L.C., Margalit, S., Yariv, A. ve Cho, A.Y., (1983), “A new infrared detector using electron emission from multiple quantum wells”, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B1**, 376-378.

- Sze, S.M. ve Kwok, K.N. (2007), *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons Press, New Jersey, Canada.
- Takamasu, T., Sato, K., Kido, G. (2002), "Effect of electron screening on the photoluminescence in GaAs/AlGaAs quantum wells", *Superlattices and Microstructures*, **32**, 4-6.
- Thirumavalavan, M., Tripathy, S., Shah, S., Sundararajan, B., Kalghatgi, A.T. ve Krupanidhi, S.B. (2008), *Low temperature photoluminescence study of (GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As) QWIP structure*.  
<http://een.iust.ac.ir/profs/Sadr/Papers/omd6.5.pdf>
- Tidrow, M.Z., Beck, W.A., Clark, W.W., Pollehn, H.K., Little, J.W., Dhar, N.K., Leavitt, R.P., Kennerly, S.W., Beekman, D.W., Goldberg, A.C. ve Dyer, W.R. (1999), "Device Physics and focal plane array applications of QWIP and MCT", *Opto-electronics*, **7(4)**, 283-296.
- Tyagi, M.S. (1991), *Introduction to Semiconductor Materials and Devices*, John Wiley & Sons. Ltd., India.
- Varshni, Y.P. (1967a), "Temperature Dependence of the Energy Gap in Semiconductors", *Physica*, **34**, 149-154.
- Varshni, Y.P. (1967b), "Band to Band Radiative Recombination in Semiconductors", *Phys. Stat. Solid*, **19**, 459-514.
- Wang, Y., Yoon, S.F., Liu, C.Y., Ngo C.Y. ve Ahn J. (2008), "Temperature and excitation density dependent photoluminescence of sputtering-induced GaAs/AlGaAs quantum dots", *Nanotechnology*, **19**, 15602-15606.
- Wilson, J. ve Hawkes J.F.B. (2000), *Optoelektronik*, Değişim Yayınları, Adapazarı.
- West, L.C. ve Eglash, S.J. (1985), "First observation of an extremely large-dipole infrared transition within the conduction band of a GaAs quantum well", *Appl.Phys.Lett.*, **46**, 1156-1158.
- Zeghbrock, B.V. (2007), *Semiconductor Fundamentals*,  
[http://ecee.colorado.edu/~bart/book/chapter2/ch2\\_3.htm](http://ecee.colorado.edu/~bart/book/chapter2/ch2_3.htm)