

T1724

T1745

+

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
MERKEZ KÜTÜPHANESİ

İNALGaAs/GaAs KUANTUM KUYU LAZERİNİN AKIM-GERİLİM VE IŞIMA
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Melek TUNÇAY KARABULUT

YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

2004

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**INALGaAs/GaAs KUANTUM KUYU LAZERİNİN AKIM-GERİLİM VE IŞIMA
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Melek TUNÇAY KARABULUT

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi tarafından
2003.02 0121.013 no'lu yüksek lisans tez projesi kapsamında desteklenmiştir.

2004

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

INAlGaAs/GaAs KUANTUM KUYU LAZERİNİN AKIM-GERİLİM VE IŞIMA
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Melek TUNÇAY KARABULUT

YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

Bu tez 03.06/2004 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından ~~seksen beş~~ (85) not takdir edilerek oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir

Doç. Dr. Asiye ULUĞ (Danışman)

Yrd. Doç. Dr. Şerafettin YALTKAYA

Prof. Dr. Ertuğrul ARPAÇ

A. Uluğ

Ş. Yalıtıkaya

E. Arpaç

ÖZET

INAlGaAs/GaAs KUANTUM KUYU LAZERİNİN AKIM-GERİLİM VE IŞIMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Melek TUNÇAY KARABULUT

Yüksek Lisans Tezi, Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Asiye ULUĞ

Mayıs 2004, 57 Sayfa

Bu çalışmada periyodik tablodaki III-V grubu elementlerinden oluşan ve metal organik kimyasal buhar çökeltmesi (MOCVD) yöntemiyle büyütülmüş, tek kuantum kuyulu $In_{0.09}Al_{0.17}Ga_{0.85}As/GaAs$ yapısındaki lazerin oda sıcaklığında akım-gerilim (I-V), elektrolüminesans (EL) ve optik güç-akım (L-I) özellikleri incelenmiştir

I-V ölçümleri sonucunda kuantum kuyu lazerinin eşik gerilimi 0.85 V olarak bulunmuş ve seri direnci 11.65Ω olarak hesaplanmıştır. EL ölçümleri ile lazerin 807 nm dalgaboyunda ışımaya yaptığı belirlenmiştir. L-I ölçümlerinden ise eşik akımı 140.8 mA ve türevsel kuantum verimi % 22 olarak elde edilmiştir

ANAHTAR SÖZCÜKLER : Kuantum kuyu lazerleri, InAlGaAs/GaAs

JÜRİ : Doç. Dr. Asiye ULUĞ (Danışman)

Yrd. Doç. Dr. Şerafettin YALTKAYA

Prof. Dr. Ertuğrul ARPAÇ

ABSTRACT

INVESTIGATING CURRENT-VOLTAGE AND LUMINESCENCE PROPERTIES OF $\text{In}_{0.09}\text{Al}_{0.17}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ QUANTUM WELL LASER

Melek TUNÇAY KARABULUT

M. Sc. in Physics

Adviser: Assoc. Prof. Dr. Asiye ULUĞ

May 2004, 57 Pages

In this work, current-voltage (I-V), electroluminescence (EL), optical power-current (L-I) properties of $\text{In}_{0.09}\text{Al}_{0.17}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ single quantum well laser that is the alloy of III-V group of periodical table were investigated at room temperature. The structure was grown by metal organic chemical vapour deposition (MOCVD).

At the results of I-V measurements, the threshold voltage of quantum well laser was found to be 0.85 V and the serial resistance was calculated 1.65 Ω . Emission wavelength was determined around 807 nm with EL measurements. Threshold current was obtained 140.8 mA and differential quantum efficiency was calculated % 22 from L-I measurements.

KEY WORDS : Quantum well laser, $\text{InAlGaAs}/\text{GaAs}$.

COMMITTEE : Assoc. Prof. Dr. Asiye ULUĞ (Adviser)

Asst. Prof. Dr. Şerafettin YALTKAYA

Prof. Dr. Ertuğrul ARPAÇ

ÖNSÖZ

Kuantum kuyu lazerleri 1975 yılında üretiminden itibaren geniş dalgaboyu aralığı (kızıl ötesinden görünür bölgeye kadar) ve geniş güç aralığı (1mW'dan 1000W'a kadar) ile en çok kullanılan yarıiletken lazerler olmuşlardır. Kuantum kuyu lazerleri özellikle fiber optik iletişim sistemleri olmak üzere disk sürücü, lazer yazıcı, video kayıt sistemleri gibi pek çok endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır. Bu çalışmada $In_{0.09}Al_{0.17}Ga_{0.85}As/GaAs$ tek kuantum kuyu lazerinin akım-gerilim ve ışınma özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Bana bu konuda çalışma olanağı veren danışmanım Sayın Doç. Dr. Asiye ULUĞ'a (A.Ü.F.E.F), tecrübelerinden faydalandığım Sayın Prof. Dr. Bülent ULUĞ'a (A.Ü.F.E.F), çalışmada kullanılan kuantum kuyu lazerini sağlayan Sayın Prof. Dr. Naci BALKAN'a (Essex Ü.) ve çalışmalar boyunca yardımlarını gördüğüm ve içten dostluğuyla her zaman yanımda olan Sayın Arş. Gör. Mükremin YILMAZ'a (A.Ü.F.E.F) teşekkürlerimi sunarım. Bu yüksek lisans tezi, Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi tarafından 2003.02.0121.13 no'lu yüksek lisans tez projesi kapsamında desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL BİLGİLER.....	5
2.1. Lazerler.....	5
2.1.1. Kendiliğinden ve uyarılmış salınım.....	5
2.1.2. Nüfus terslenmesi.....	6
2.1.3. Optik kavite.....	8
2.2. Yarıiletken Lazerler.....	9
2.3. Kuantum Kuyu Lazerleri.....	12
2.3.1. Enerji düzeyleri.....	14
2.3.2. Durum yoğunluğu.....	19
2.3.3. Fermi dağılım fonksiyonu.....	20
2.3.4. Kazanç hesapları.....	21
2.3.5. Türevsel kuantum verimliliği.....	22
2.4. Yarıiletken Lazer Oluşturma Yöntemleri.....	24
2.4.1. Sıvı faz epitaksisi (Liquid phase epitaxy-LPE).....	24
2.4.2. Moleküler demet epitaksisi (Molecular beam epitaxy-MBE).....	24
2.4.3. Metal organik kimyasal buhar çökeltmesi (Metal organic chemical vapour deposition-MOCVD).....	26
3. MATERYAL ve METOT.....	27
3.1. Materyal.....	27
3.1.1. Kuantum kuyu lazeri yapısı.....	27
3.1.2. Kuantum kuyu lazerinin enerji diyagramının oluşturulması.....	28
3.2. Metot.....	30

3.2.1. Akım-gerilim (I-V) ölçümleri.....	30
3.2.1.1. Deney düzeneği	30
3.2.1.2. I-V ölçümleri için hazırlanan program.....	32
3.2.2. Elektrolüminesans (EL) ölçümleri	33
3.2.2.1. Deney düzeneği	33
3.2.2.2. EL ölçümleri için hazırlanan program	34
3.2.3. Optik güç-akım (L-I) ölçümleri.....	35
3.2.3.1. Deney düzeneği	35
3.2.3.2. L-I ölçümleri için hazırlanan program.....	35
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	37
4.1 I-V Ölçümleri	37
4.2. EL Ölçümleri.....	42
4.3 L-I Ölçümleri.....	44
5. SONUÇ	48
6. KAYNAKLAR	50
7. EKLER.....	54
EK-1 I-V Ölçümleri İçin Yazılan Program	54
EK-2 EL Ölçümleri İçin Yazılan Program	55
EK-3 L-I Ölçümleri İçin Yazılan Program	56
ÖZGEÇMİŞ.....	57

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

\hbar, h	Planck sabiti
k_B	Boltzman sabiti
ν, ω	Foton frekansı
T	Sıcaklık
E_F	Fermi enerjisi
E_{Fc}	İletim bandı Fermi enerjisi
E_{Fv}	Değerlik bandı Fermi enerjisi
E_g	Yasak enerji aralığı
E_m	Elektron enerji düzeyi
E_n	Delik enerji düzeyi
ψ	Dalga fonksiyonu
$V(z)$	Kuyu potansiyeli
k_1, k_2, k_x, k_y	Dalga sayıları
e	Elektron yükü
m_0	Serbest elektron kütlesi
m_e	Elektron etkin kütlesi
W, d_1	Kuantum kuyu genişliği
$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$	Luttinger parametreleri
$N(E)$	Durum yoğunluğu
H	Heaviside fonksiyonu
g	Kazanç
ϵ_0	Boşluğun dielektrik sabiti
c	Işığın boşluktaki hızı
n_r	Kırılma indisi
$ M_{nm} $	Momentum matris elemanı
N	Elektron yoğunluğu
N_p	Foton yoğunluğu
η_i	İç kuantum verimliliği
η_d	Türevsel kuantum verimliliği

G	Aktif bölgeye gönderilen elektronların oranı
R	Aktif bölgede yeniden birleşen elektron oranı
V_g	Foton akış hızı
α_i	İç kayıplar
α_m	Ayna kayıpları
P	Çıkış gücü

Kısaltmalar

VCSEL	Dik Kaviteli YüzeYden Işıyan Lazer (Vertical Cavity Surface Emitting Laser)
DFB	Dağılmış Geri Besleme Lazeri (Distributed Feedback Laser)
EEL	Kenardan Işıyan Lazer (Edge Emitting Laser)
LPE	Sıvı Faz Epitaksisi (Liquid Phase Epitaxy)
MBE	Moleküler Demet Epitaksisi (Molecular Beam Epitaxy)
MOCVD	Metal Organik Kimyasal Buhar Çökeltmesi (Metal Organic Chemical Vapour Deposition)
GRINSCH	Eğimli Kırılma İndisli Ayrı HapislemeYli Çok EklemeYli Yapısı (Graded Index Separate Confinement Heterostructure)
BEP	Demet Eşdeğer Basınç (Beam Equivalent Pressure)
RHEED	Yüksek Enerjili Elektron Kırınımı (Reflection High Energy Electron Diffraction)
I-V	Akım-Gerilim
EL	Elektrolüminesans
L-I	Optik Güç-Akım
A.Ü.F.E.F	Akdeniz Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi
Essex Ü	Essex Üniversitesi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Farklı dalgalarda ışık yapan yarıiletken bileşikler	2
Şekil 2.1. a) İki enerji seviyeli sistem b) Uyarılmış soğurma c) Kendiliğinden salınım d) Uyarılmış salınım	6
Şekil 2.2. a) Üç enerji seviyeli sistem b) Dört enerji seviyeli sistem	7
Şekil 2.3. a) Fabry-Perot Kavite b) Kavite içindeki optik modlar	8
Şekil 2.4. Denge durumundaki p-n eklemının enerji diyagramı	9
Şekil 2.5. İleri besleme durumundaki p-n eklemi	10
Şekil 2.6. a) Yoğun katkılanmış p-n eklemi b) İleri besleme durumundaki yoğun katkılanmış p-n eklemi	11
Şekil 2.7. Işık şiddetinin akıma göre değişimi	11
Şekil 2.8. İleri beslemede çok eklemli pin yapısı	12
Şekil 2.9. a) Kuantum kuyu yapısının geometrisi b) Kuantum kuyusundaki elektron ve delikler için enerji düzeyleri	13
Şekil 2.10. a) GRINSCH lazer yapısının enerji diyagramı b) GRINSCH yapısının kırılma indisi değişimi ve aktif bölge içinde optik dalğanın sınırlandırılması	14
Şekil 2.11. Sonlu potansiyel kuyusundaki enerji değerleri için grafiksel çözüm	18
Şekil 2.12. İki boyutlu sistemde durum yoğunluğunun enerjiye bağlı değişimi	20
Şekil 2.13. AlGaAs ve GaAs yapılarının LPE tekniğiyle büyütülmesi	24
Şekil 2.14. MBE sisteminde büyütme odası	25
Şekil 2.15. MOCVD sistemi	26
Şekil 3.1. Kuantum kuyu lazerin yapısı	27
Şekil 3.2. Kuantum kuyu lazerinin enerji diyagramı	28
Şekil 3.3. I-V ölçüm düzeneği	30
Şekil 3.4. Akım-gerilim kaynağının uygulanan gerilime karşı akım ölçümü olarak kullanımının gösterilmesi	31
Şekil 3.5. I-V ölçümleri için kullanılan programın ve grafiğe dönüştürülmüş bir verinin ekran görüntüsü	32
Şekil 3.6. EL ölçüm düzeneği	33

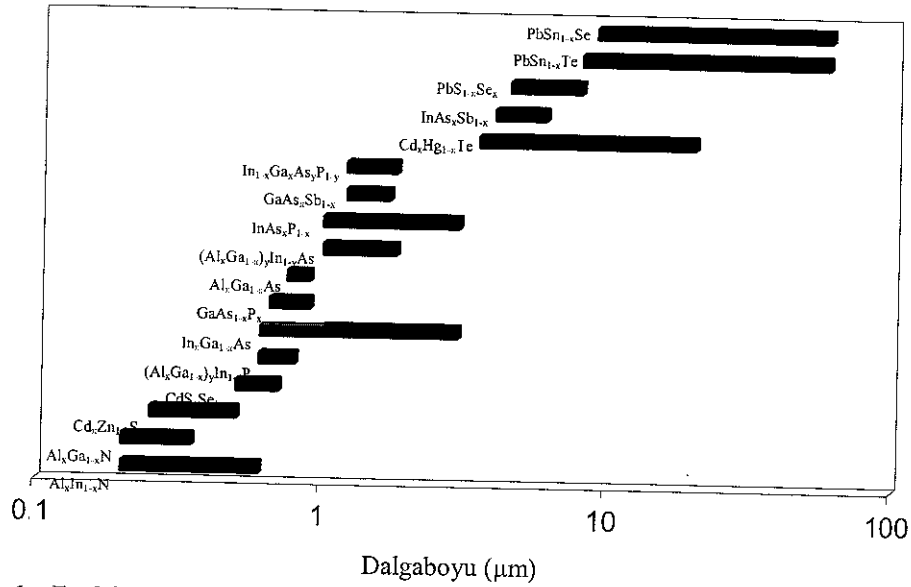
Şekil 3.7 EL ölçümleri için kullanılan programın ve grafiğe dönüştürülmüş bir verinin ekran görüntüsü	34
Şekil 3.8 L-I ölçümleri için kullanılan programın ve grafiğe dönüştürülmüş bir verinin ekran görüntüsü	36
Şekil 4.1. Kuantum kuyu lazerinin oda sıcaklığındaki farklı gerilim artışları uygulanarak elde edilen I-V karakteristikleri	38
Şekil 4.2. Kuantum kuyu lazerinin oda sıcaklığındaki farklı frekanslarda darbeler uygulanmasıyla elde edilen I-V karakteristikleri	38
Şekil 4.3 Kuantum kuyu lazerinin oda sıcaklığındaki I-V karakteristiği (Balkan 2003).....	39
Şekil 4.4. Metal ile p-tipi yarıiletken arasında oluşan kontak potansiyeli	39
Şekil 4.5. Kuantum kuyu lazerinin oda sıcaklığındaki I-V karakteristiği	41
Şekil 4.6. Kuantum kuyu lazerinin oda sıcaklığındaki I-V karakteristiği (Balkan 2003)	41
Şekil 4.7 Kuantum kuyu lazerinin oda sıcaklığındaki EL eğrisi.....	43
Şekil 4.8 Kuantum kuyu lazerinin oda sıcaklığındaki EL eğrisi (Balkan 2003).....	43
Şekil 4.9. Kuantum kuyu lazerinin oda sıcaklığında eşik akım değerinden önceki L-I karakteristiği.....	45
Şekil 4.10 Kuantum kuyu lazerinin oda sıcaklığında L-I karakteristiği (Balkan 2003)	45
Şekil 4.11 Kuantum kuyu lazerinin oda sıcaklığında doyuma ulaşmadan önceki L-I karakteristiği (Balkan 2003).....	46
Şekil 4.12. Kuantum kuyu lazerinin oda sıcaklığında eşik akım değerinden önceki L-I karakteristiği (Balkan 2003).....	46

1. GİRİŞ

Yarıiletken lazerler, aktif lazer ortamının p-n eklemiyle sağlandığı ve bu ortamdaki elektron ve deliklerin birleşerek foton yayımı gerçekleştirdikleri aygıtlardır. Elektron ve deliklerin aktif lazer ortamında nüfus terslenmesini sağlaması, yoğun katkılanmış p-n eklemının ileri beslenmesiyle elde edilir.

İlk yarıiletken lazer, GaAs p-n ekleminden Robert Hall ve arkadaşları (1962) tarafından yapılmıştır. Bu ilk yarıiletken lazer 840 nm dalgaboyunda ışımaya sağlamıştır. Ardından Nathan vd (1962) GaAs p-n ekleminden ve Holonyak vd (1962) GaAs_{1-x}P_x yapısında eş fazlı ışımaya oluştuğunu göstermişlerdir. Bu ilk lazerlerdeki oda sıcaklığında sürekli ışımaya, eşik akım yoğunluğunun büyük olmasından dolayı sağlanamamıştır. Bu durum çok eklemli yapıların teorilerinin ortaya çıkmasına sebep olmuştur (Kroemer 1963). 1965'de Lincoln Laboratuvarı çalışanları yoğun katkılanmış InSb p-n eklemi ile oluşturulan lazerin yüzeyden ışınması sağlanmıştır (Melngailis 1965). Buna ek olarak boyuna elektrik ve optik pompalama ile ince yarıiletken tabakaların lazer olarak kullanılabilmesi gösterilmiştir (Basov vd 1966, Bogdankevich vd 1973). Böylece dik kaviteli yüzeyden ışınan lazerlerin (Vertical Cavity Surface Emitting Laser-VCSEL) ilk uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Çok eklemli lazerler ile oda sıcaklığında sürekli ışımaya elde edebilmek için birçok laboratuvarında çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Rupprecht vd 1967, Burnham vd 1970) fakat 300K'de ilk yarıiletken lazer ışınması 1970'de sağlanmıştır (Hayashi vd 1970). 1972 yılında ise dağılmış geri besleme lazeri (Distributed Feedback Laser-DFB) üretilmiştir (Kogelnik ve Shank 1972). İlk kuantum kuyu lazeri ise moleküler demet epitaksisi (Molecular Beam Epitaxy-MBE) yöntemiyle büyütülmüş AlGaAs/GaAs yapısıyla elde edilmiştir (Van der Ziel vd 1975, Cho vd 1976). Bu çalışmaları sıvı faz epitaksisi (Liquid Phase Epitaxy-LPE) yöntemiyle büyütülmüş In_{1-x}Ga_xP_{1-z}As_z yapısında kuantum kuyu lazerleri takip etmiştir (Rezek vd 1977-a, Rezek vd 1977-b). İlk kez oda sıcaklığında çalışan kuantum kuyu lazeri ise metal organik kimyasal buhar çökeltmesi (Metal Organic Chemical Vapour Deposition-MOCVD) yöntemiyle büyütülmüş Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs yapısıyla elde edilmiştir (Dupuis ve Dapkus 1977). Ardından optik pompalama uygulanarak oda sıcaklığında çalışan kuantum kuyu lazeri üretilmiştir (Holonyak vd 1978). 1978'de eğimli kırılma indisli ayrı hapislemeli çok eklemli yapısı (Graded Index Separate Confinement

Heterostructure-GRINSCH) icat edilmiştir (Tsang 1982) Bu çalışmaları oda sıcaklığında ışına yapan $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ yapısında tek ve çok eklemli kuantum kuyuları izlemiştir (Dupuis vd 1979-a, Dupuis vd 1979-b). Yapılan çalışmalar sonucunda Şekil 1.1'de gösterildiği gibi çeşitli dalgalıboylarında ışına yapan birçok yarıiletken bileşikler üretilmiştir.



Şekil 1.1 Farklı dalgalıboylarında ışına yapan yarıiletken bileşikler (Saleh ve Teich 1991)

1.3-1.6 µm dalgalıboylarında ışına yapan yarıiletken lazerler optik iletişim sistemlerinde ışık kaynağı olarak kullanıldıkları için oldukça önemlidirler. Çünkü ışığın iletiminde kullanılan fiber optik kabloların kayıplarının en az olduğu dalgalıboyu aralığı bu bölgeye karşılık gelir. Bu uzun dalgalıboylu lazerler genellikle InP alt taban üzerine büyütülen InGaAsP bulk tabakası veya kuantum kuyusu kullanılarak elde edilir. Fakat bu sistemler oldukça zayıf yüksek-sıcaklık karakteristiklerine sahiptirler. Ayrıca bu sistemler kullanılarak oluşturulan kuantum kuyularında taşıyıcıların sınırlandırılması zayıf olduğundan lazerin çıkış gücü düşüktür. Bu yüzden uzun yıllar boyu, GaAs tabanlı yapıların üretimi çok iyi geliştiği için özellikle GaAs alt taban üzerine büyütülmüş uzun dalgalıboylu yapılar üretilmeye çalışılmıştır.

1.3-1.6 µm dalgalıboylarında ışına sağlamak için yapılan yaklaşımlardan ilki kuantum kuyu lazerlerinin boyutlarında yapılan çalışmalar sonucunda ortaya çıkan bir boyutlu (1D) ve sıfır boyutlu (0D) lazerlerdir (Arakawa ve Sakaki 1982, Asada vd

1986). Bu lazerlerin kuantum kuyularına göre avantajı sıcaklığa daha az bağımlı olmaları ve düşük eşik akım yoğunluklarına sahip olmalarıdır. Fakat bu yapıların ticari olarak üretimi konusunda önemli gelişme sağlanmamıştır.

Optik iletişim sistemlerinde kullanılmak üzere üretilen lazerler için diğer bir yaklaşım GaAs alt taban üzerine büyütülmüş GaInNAs yapılarıdır (Kondow vd 1996, Larson vd 1997). Bu yapılar InP tabanlı yapılara göre daha iyi sıcaklık karakteristiklerine sahiptirler. Yapıdaki azot oranının band aralığındaki değişimi sağlaması, bu yapıları uzun dalgaboylu lazer üretimi için uygun materyal yapmıştır. GaInNAs/GaAs yapısıyla 1.3 μm dalgaboyunda kenardan ışılan lazer (Edge Emitting Laser-EEL) üretilmesi ile ilk ticari ürünler yapılmaya başlanmıştır (Kondow vd 1997, Sato vd 1997)

2002 yılından itibaren çeşitli gruplar InN yapısının yasak enerji aralığının daha önceki çalışmalarda belirlenen 1.89 eV değerinden (Tansley ve Foley 1986) çok daha küçük enerji aralığına sahip olduğunu göstermişlerdir (Davydov vd 2002, Wu vd 2002, Matsuoka vd 2002, Hori vd 2002). InN yapısının 0.65-0.90 eV arasında bulunan dar band aralığı değerlerinin fiber optik kayıplarının en az olduğu dalgaboyu aralığı ile uyumlu olması bu yapıların optik teknolojide önemli bir yere sahip olacağını göstermektedir. InN yapısının dar band aralığına sahip olması düşük akımlarda ışımaya oluşturunmasını sağlar. Ayrıca InN yapısı tüm azotlu yarıiletken bileşikler içerisinde en düşük elektron etkin külesine sahip yapıdır (Mohammad ve Markoc 1996). Elektronların düşük etkin küleyle dolayısıyla yüksek mobiliteye sahip olması, yapının çeşitli sıcaklık ve taşıyıcı konsantrasyonlarında oldukça hassas taşıma karakteristiklerine sahip olmasını sağlamaktadır (Bellotti vd 1999, Foutz vd 1999).

Yarıiletken lazerler sadece fiber optik iletişim sistemlerinde değil; 370 nm, 470 nm, 540 nm, 640 nm dalgaboylarında ışımaya yapan lazerler göstergelerde; 400 nm, 480 nm, 660 nm ve 785 nm dalgaboylarında ışımaya yapan lazerler disk sürücü ve video kayıt sistemlerinde; 488nm, 532 nm, 1064 nm, 1320 nm, 1440 nm dalgaboylarında ışımaya yapan lazerler ise tıpta kullanılmaktadır. InAlGaAs/GaAs lazerleri de optik iletişim sistemlerinde kullanılan lazerler arasındadır (Tomm vd 2000, Barwolff vd 2000). Bu

çalışmada $\text{In}_{0.09}\text{Al}_{0.17}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ yapısında tek kuantum kuyu lazerinin akım-gerilim ve ışımaya özellikleri incelenerek, bu özelliklerin lazer yapısı ile ilişkilendirilmesi amaçlanmıştır. Bunun yanında bu çalışma ile yeni kurulmakta olan katıhal laboratuvarında lazer diyotların I-V, EL, L-I özelliklerinin incelenebilmesi için gerekli deney düzeneklerinin hazırlanması ve alınan sonuçların test edilmesi sağlanmıştır. Ayrıca verilerin bilgisayar kontrollü elde edilmesi için gerekli programların yazılması ve etkinleştirilmesi de çalışmanın kapsamı içinde yapılmıştır.

2. KURAMSAL BİLGİLER

2.1. Lazerler

Lazer (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) ışımının uyarılmış salınımıyla ışığın kuvvetlendirilmesi anlamına gelir. Bu tanım lazerin sıradan bir ışık olmadığını, atomların buldukları enerji seviyelerinden uyarılması sonucunda temel enerji seviyesine dönerken oluşan salınımın kuvvetlendirilmesiyle elde edilen ışık olduğunu ifade etmektedir.

Uyarılmış salınım kavramı ilk olarak 1917'de Albert Einstein tarafından ortaya atılmıştır. Lazerin temel ilkeleri ise ilk kez Shawlow ve Townes (1958) tarafından yayınlanmış ve 1960'ta optik frekans bölgesinde ışımaya yapan lazer yapılmıştır (Maiman 1960) Günümüzde değişik dalgalarda ve güçlerde çalışan birçok lazer bulunmaktadır.

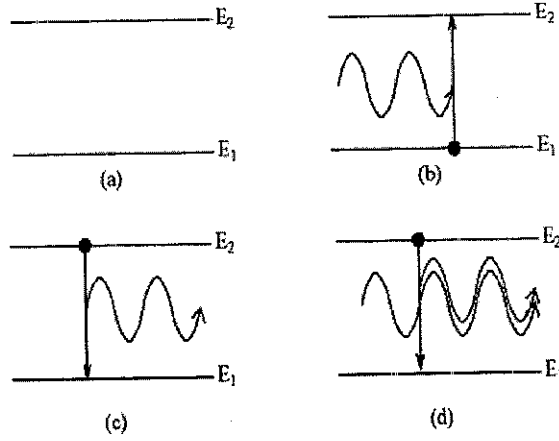
2.1.1. Kendiliğinden ve uyarılmış salınım

Atomlar Şekil 2.1 a'daki gibi iki enerji seviyesi arasında geçiş yaparsa foton salar veya soğurur. ΔE enerji seviyeleri arasındaki fark olmak üzere foton frekansı,

$$\nu = \Delta E / h \quad (2.1)$$

ile verilir. Alt enerji seviyesindeki (E_1) atom, enerji seviyeleri arasındaki fark enerjisine sahip fotonları soğurarak üst enerji seviyesine (E_2) geçebilir. Bu durum Şekil 2.1 b'de gösterilmekte olup uyarılmış soğurma olarak adlandırılmaktadır. Üst enerji seviyesindeki atomun alt enerji seviyesine geçişi ise iki farklı yolla gerçekleşebilir. Atom herhangi bir fotonun bulunmadığı durumda tamamen rasgele yolla alt enerji seviyesine geçerse kendiliğinden salınım oluşturur (Şekil 2.1 c) Atomun enerji seviyeleri arasındaki fark enerjisine sahip fotonlar ile üst enerji seviyesinden alt enerji seviyesine geçmesi ise uyarılmış salınım olarak tanımlanır (Şekil 2.1.d) Uyarılmış salınım sonucunda, gelen foton ile aynı frekans, faz ve kutuplanmaya sahip fotonlar

oluşur. Böylece uyarılmış salınım ile gelen bir dalganın genliği, uyarılmış atomlar topluluğu boyunca geçerken yükseltilebilir. Böylece uyarılmış salınım ile ışığın kuvvetlendirilmesi sağlanmaktadır.



Şekil 2.1. a) İki enerji seviyeli sistem b) Uyarılmış soğurma c) Kendiliğinden salınım d) Uyarılmış salınım

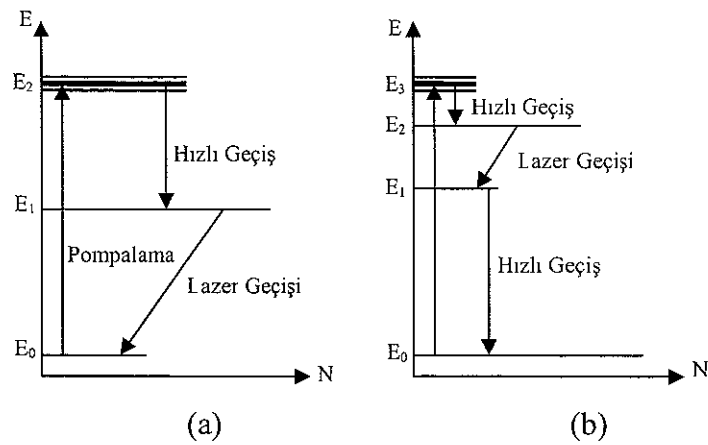
2.1.2. Nüfus terslenmesi

Atomların düşük enerji seviyelerinde bulunma eğiliminde oldukları termodinamik dengede uyarılmış salınım oluşturmak oldukça zordur. Termodinamik dengede atomların E_1 ve E_2 enerji düzeylerindeki sayıları Boltzman dağılımına göre,

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-(E_2 - E_1)/k_B T} \quad (2.2)$$

olarak verilmektedir. N_1 ve N_2 sırasıyla E_1 ve E_2 enerji düzeylerindeki atom sayıları, k_B Boltzman sabiti, T ise sıcaklıktır. Oda sıcaklığında bu oran optik bölgedeki frekanslara uygun geçişler için oldukça küçüktür. Uyarılmış salınımı oluşturabilmek için üst enerji seviyesindeki atom sayısının alt enerji seviyesindeki atom sayısından çok daha fazla olması ve böylece salınım olasılığının soğurmadan fazla olması gerekmektedir. Üst enerji seviyesindeki atom sayısını artırma işlemi nüfus terslenmesi olarak ifade edilir. Nüfus terslenmesi oluşturmanın yolu atomlara enerji vererek onları yüksek enerji seviyelerine uyarmandır. Aktif bölgedeki bu uyarma işlemi elektriksel ve optik pompalama gibi yöntemlerle sağlanabilir.

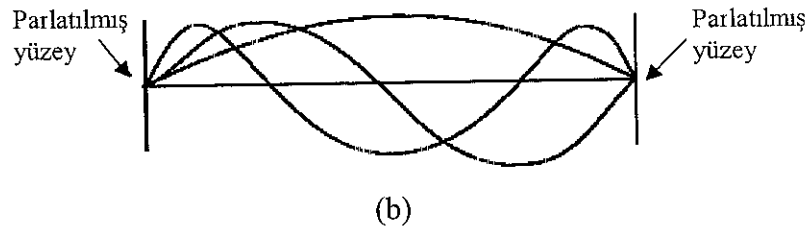
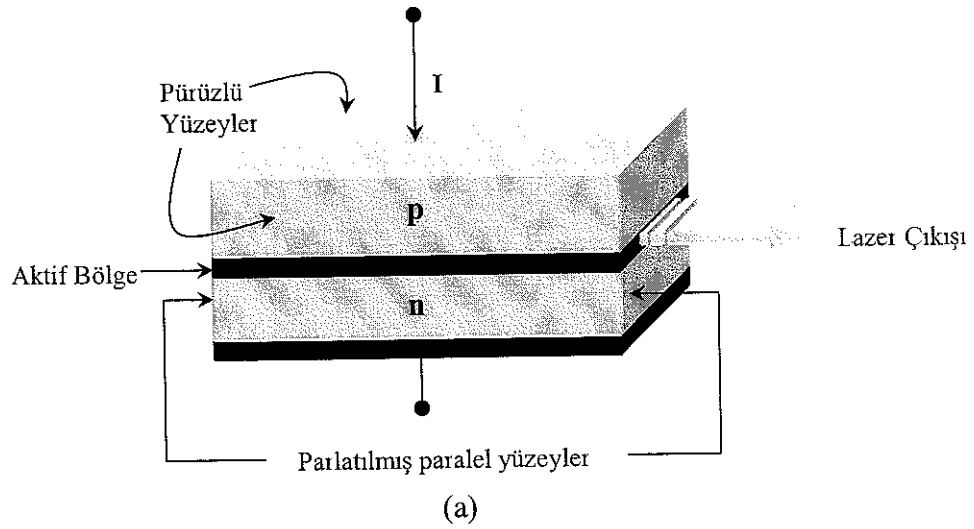
Normal olarak atom uyarılmış durumda nanosaniye mertebesinde çok kısa süre kalıp kendiliğinden salınım ile düşük enerji seviyesine geçer. Bundan dolayı nüfus terslenmesi oluşturmak için atomların uyarılmış düzeylerde uzun süre bulunmalarını sağlayacak durumlar oluşturmak gerekir. Bu durumlar atomların mikrosaniye ve milisaniye mertebesinde buldukları yarı kararlı seviyelerdir. İki seviyeli sistemlerde nüfus terslenmesi elde etmek mümkün olmaz çünkü en şiddetli pompalamada bile her iki enerji seviyesindeki atom sayıları birbirine eşit olur. Lazer sistemleri üç, dört veya daha fazla enerji seviyelerine sahiptir. En basit enerji seviyeli yapı; üst enerji seviyesi (E_2), yarı kararlı seviye (E_1) ve taban seviyesinden (E_0) oluşan üç seviyeli lazerlerdir (Şekil 2.2 a). Atom grubu şiddetli pompalama ile taban seviyesinden üst enerji seviyesine uyarılabilir. İdealde üst enerji seviyesinde yeni uyarımlar için yer oluşturmak amacıyla, üst enerji seviyesinden yarı kararlı seviyeye hızlı geçiş olması istenir. Böylece yarı kararlı seviyede atom sayısı artışı sağlanır. Fakat üç seviyeli sistemlerde lazer geçişi için son seviyenin taban seviyesi olması çok yüksek pompalama gücü gerektirir. Pratikte daha çok kullanılan lazerler ise dört seviyeli sistemlerdir (Şekil 2.2 b). Üç aşamalı sistemlerdeki gibi atomlar taban seviyesinden (E_0) en üst seviyeye (E_3) kısa sürede uyarılır. Daha sonra atomlar hızlıca yarı kararlı seviyeye (E_2) geçerler. Lazer geçişi ise atomların yarı kararlı seviyeden bir alt enerji seviyesine (E_1) geçişiyle gerçekleşir. Bundan sonra atomlar kendiliğinden salınım yoluyla taban seviyesine inerek enerjilerinin tamamen kaybederler. Bu tür sistemlerde nüfus terslenmesi orta şiddette pompalamayla devam ettirilebilir ve sürekli bir lazer olayı kolayca sağlanabilir.



Şekil 2.2 a) Üç enerji seviyeli sistem b) Dört enerji seviyeli sistem

2.1.3. Optik kavite

Lazer oluşturmak için sadece nüfus terslenmesinin sağlanmış olması yetmez. Işının büyük bir kısmının yansıma gibi geri besleme yoluyla lazer ortamına geri döndürülmesi ile uyarılmış salınımın kuvvetlendirilmesi sağlanmalıdır. Bu nedenle ortamın verimliliğini artırmak ve ışık demeti oluşturmak için optik kaviteye ihtiyaç duyulur. Yarıiletken lazerlerde en çok kullanılan kavite, uzunluğu $150 \mu\text{m}$ ile 1 mm arasında değişen Fabry-Perot kavitedir (Şekil 2.3.a) Yapının en önemli kısmı Şekil 2.3.b'de gösterilen eş fazlı modların oluşumunu sağlayan yüzey aynalarıdır. İki ayna arasındaki mesafe eğer foton dalgaboyunun yarısının tam katlarıysa eş fazlı modlar oluşur. Sadece bu eş fazlı modlar oluştuğu anda uyarılmış salınım elde edilebilir. Diğer pürüzlü yüzeylerden fotonlar yansıyamadıkları için eş fazlı modları oluşturamazlar. Fabry-Perot lazer çıkışı birçok enine ve boyuna moda sahip olduğundan spektral saflığı iyi değildir. Çıkış frekansını kararlı kılmak modlardan birinin diğerinden daha yüksek kazançla sahip olmasıyla başarılabilir.

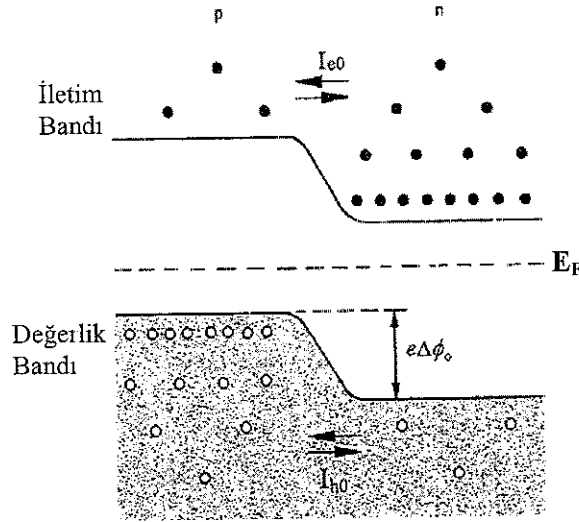


Şekil 2.3 a) Fabry-Perot Kavite b) Kavite içindeki optik modlar (Singh 1995)

2.2. Yarıiletken Lazerler

Yarıiletken lazerler, yoğun katkılanmış p-n eklemine ileri besleme uygulanması durumunda elektron ve deliklerin birleşerek foton yayımı gerçekleştirdikleri aygıtlardır.

p-n eklemi epitaksiyel büyütme, iyon aşılması ve verici difüzyonu gibi yöntemler kullanılarak oluşturulur. p-n eklemi oluşturulduktan sonra eklem üzerindeki taşıyıcılardaki yoğunluk değişimi, azalan yoğunluklar doğrultusunda difüzyon akımına neden olur. Böylece elektronlar n bölgesinden p bölgesine benzer olarak da delikler p bölgesinden n bölgesine difüze olmaya başlarlar. Difüzyon akımının net etkisi p bölgesinin n bölgesine göre negatif yüklenmesi olup eklem bölgesinde kontak potansiyeli olarak bilinen bir potansiyel fark, $\Delta\phi_0$, oluşturmasıdır. Fermi enerjisi, E_F , eklem boyunca sabittir (Şekil 2.4)

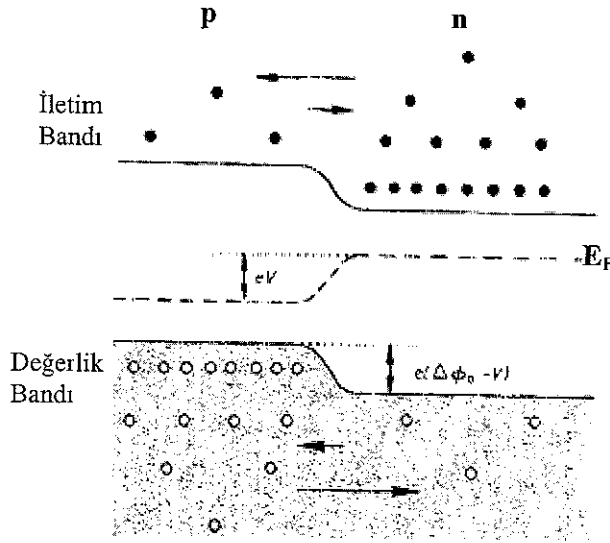


Şekil 2.4. Denge durumundaki p-n eklemine enerji diyagramı. İletim bandındaki elektronlar dolu dairelerle, değerlik bandındaki delikler boş dairelerle gösterilmektedir (Hook ve Hall 1999)

Eklem bölgesinde oluşan potansiyel nedeniyle, n tarafındaki iletim bandında bulunan elektronlardan sadece potansiyel engelini aşabilenler p tarafına difüze olurlar. Ayrıca p tarafında da elektron ve delikler oluşum hızları sıcaklığa bağlı olacak şekilde sürekli oluşturulur. Böylece elektronlar için eklem üzerinde, n bölgesindeki yüksek

elektron yoğunluğu nedeniyle n tarafından p tarafına akan difüzyon akısı (I_{e0}) ve p tarafında oluşan elektronların eklem bölgesindeki alan tarafından çekilmesi ile p tarafından n tarafına akan oluşma akısı olmak üzere iki akı mevcuttur. Delikler için de p tarafından n tarafına akan difüzyon akısı (I_{h0}) ile ters doğrultuda akan delik oluşma akısı mevcuttur. Denge durumunda elektron ve delik için her iki akıda eşittir ve bu akılar Şekil 2.4 'de gösterilen oklarla ifade edilmiştir.

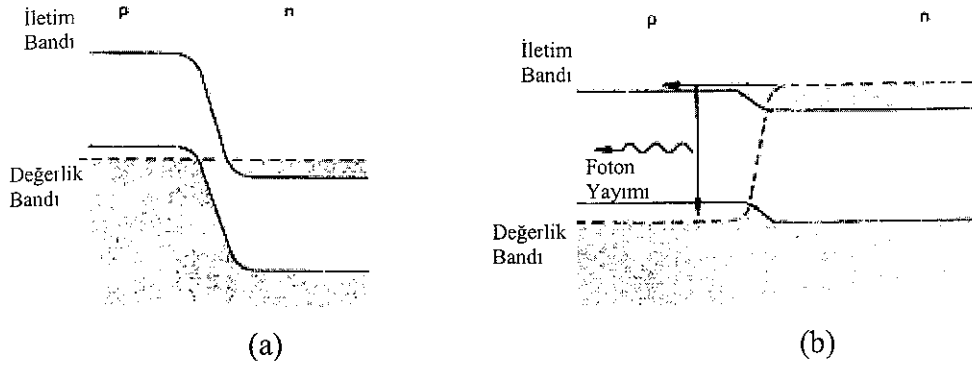
Denge durumundaki p-n eklemine V potansiyeli değerinde ileri besleme uygulandığında eklem bölgesindeki potansiyel eV kadar azalır. Potansiyel engeli azaldığı için n bölgesinden p bölgesine elektron akışı ve p bölgesinden n bölgesine delik akışı artacağından taşıyıcılar oluşan net akıma katkıda bulunurlar. p ve n bölgelerindeki Fermi düzeyleri arasında eV kadar fark oluşur (Şekil 2.5)



Şekil 2.5. İleri besleme durumundaki p-n eklemi (Hook ve Hall 1999)

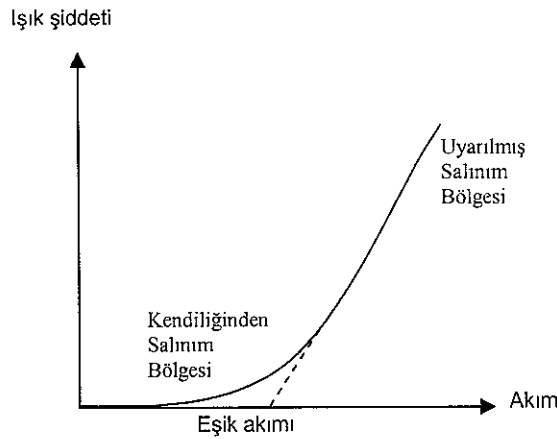
Yoğun katkılanmış eklemlerde ise Fermi düzeyi p tarafında değerlik bandı, n tarafında ise iletim bandı içinde bulunur (Şekil 2.6 a). Bunun sonucu olarak, p tarafındaki değerlik bandının tepesine yakın durumlar boştur. Eklemdaki potansiyel farkını yaklaşık olarak yok eden bir ileri beslemenin uygulanması, p tarafındaki iletim bandı kenarına yakın durumlarda çok sayıda elektronun bulunmasıyla sonuçlanır (Şekil 2.6.b). Eklemin p tarafında, iletim bandı kenarına yakın bölgede, değerlik bandı

kenarına oranla daha fazla elektron bulunması nüfus terslenmesi durumunu sağlar. Böylece bu bölgede fotonlar, elektron-delik yeniden birleşim süreci sonucunda üretilebilirler.



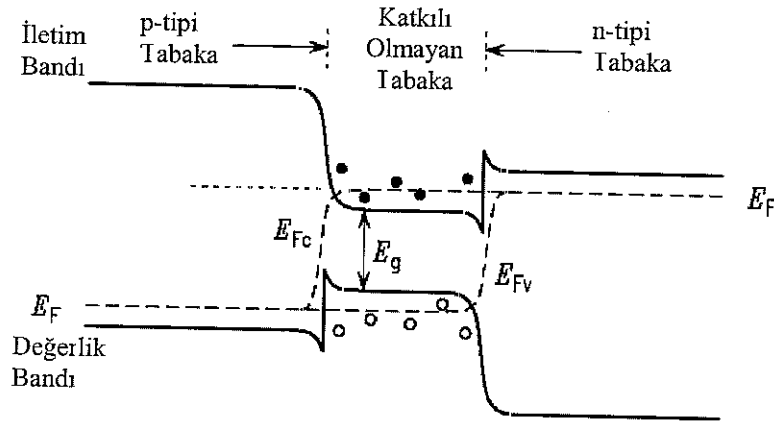
Şekil 2.6. a) Yoğun katkılanmış p-n eklemi b) İleri besleme durumundaki yoğun katkılanmış p-n eklemi (Hook ve Hall 1999)

Yarıiletken lazerlerde kazanç, uyarılmış salınımın soğurmadan fazla olması durumunda sağlanır. İleri besleme sonucu yarıiletken lazerlere uygulanan düşük akım değerlerinde, kendiliğinden salınım oluşur. Akım değeri arttıkça yarıiletken lazerler eşik akımına ulaşırlar ve nüfus terslenmesiyle ışınım oluşturmaya başlarlar. Eşik akımından sonraki akım değerlerinde ise uyarılmış salınım oluştuğu için ışık şiddeti çok hızlı artmaktadır (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Işık şiddetinin akıma göre değişimi

Basit bir p-n eklemünde ışınım oluşturmak için çok yüksek eşik akım değerleri gerekmektedir. Düşük akımlarda lazer ışınımı oluşturmak için Şekil 2.8'de gösterilen çok eklemli pin yapısı kullanılır. Bu yapılarda, direkt band aralığına sahip katkı olmayan tabaka daha geniş band aralığına sahip p-tipi ve n-tipi materyaller tarafından sarılır. Ekleme ileri besleme uygulandığında, katkı olmayan tabakadaki Fermi seviyeleri, E_{Fc} ve E_{Fv} , sırasıyla iletim bandı ve değerlik bandı içine yerleşirler. Böylece taşıyıcılar iletim bandı ve değerlik bandındaki iki engelin arasında sınırlandırılırlar ve katkı olmayan tabaka içinde yeniden birleşmeye zorlanırlar. Dar band aralığına sahip bölgede taşıyıcılar sınırlandırıldığı için nüfus terslenmesi ve ışınım işlemi basit bir p-n eklemine oranla çok daha düşük akımlarda gerçekleştirilebilir. Ayrıca bir çok yarıiletken materyal sisteminde, yapının ortasındaki katkı olmayan tabaka yüksek kırılma indisine sahip olduğundan, bu yapı düzeni optik dalga kılavuzu gibi çalışır.

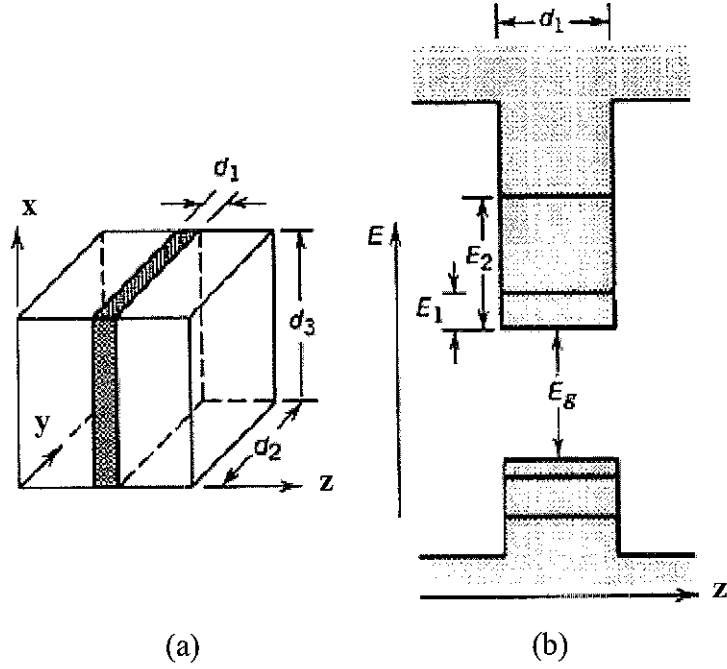


Şekil 2.8. İleri beslemede çok eklemli pin yapısı (Saleh ve Teich 1991)

2.3. Kuantum Kuyu Lazerleri

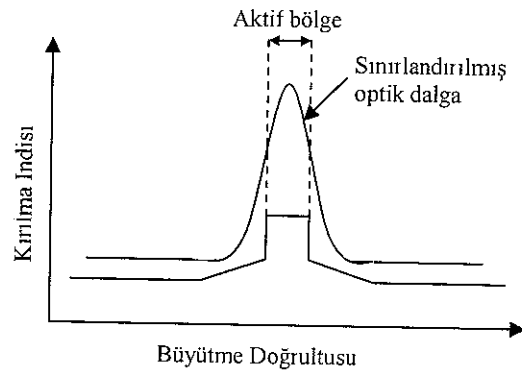
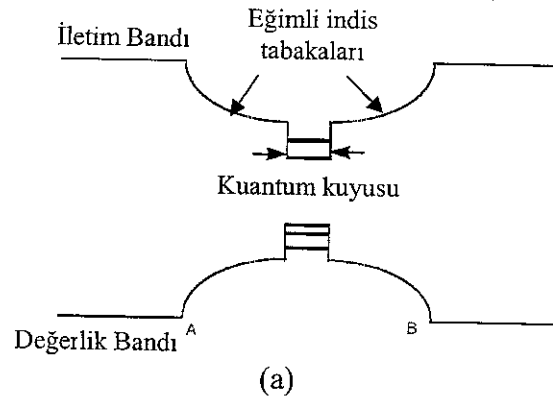
Kuantum kuyu lazerleri band aralıkları farklı iki materyalin MBE ve MOCVD gibi yöntemler kullanılarak büyütülmesiyle oluşturulur. Dar band aralığına sahip materyal kendisinden daha geniş band aralığına sahip materyal tarafından sarılır. Dar band aralığına sahip materyal oldukça ince ($d_1 < 50\text{nm}$) büyütülürse kuantum etkileri gözlenebilmektedir (Şekil 2.9.a). Kuantum kuyu lazerlerinde taşıyıcılar büyütme doğrultusuna dik doğrultularda serbestçe hareket edebildikleri halde büyütme doğrultusunda sadece belirli enerji düzeylerinde bulunabildiklerinden hareketleri

sınırlanmaktadır (Şekil 2.9.b). Taşıyıcıların hareketlerinin sadece iki boyutta sağlanmasından dolayı bu yapılar iki boyutlu sistemler olarak incelenmektedir.



Şekil 2.9. a) Kuantum kuyu yapısının geometrisi b) Kuantum kuyusundaki elektron ve delikler için enerji düzeyleri (Saleh ve Teich 1991)

Kuantum kuyu yapılarında en çok kullanılan maddeler çok iyi örgü uyumuna sahip $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ yapısıdır. Katmanlardaki alüminyum dağılımları ile aktif bölge sınırlarının şekillendirilmesi, çok eklemli yapılarının iyileştirmesi imkanını sağlamıştır. Şekil 2.10 a'da eğimli kırılma indisli ayrı hapislemeli çok eklemli yapısının (GRINSCH) enerji diyagramı verilmiştir. Bu lazerde kuantum kuyusunu oluşturan geniş band aralığına sahip materyalin kırılma indisi (Şekil 2.10 a'da A noktasından B noktasma) eğimli olarak değişmektedir. Bu durum, kuyulardaki taşıyıcıları yakalama verimini arttırır. Ayrıca aktif bölgedeki indisin, aktif bölgeyi saran tabakaların indisinden büyük olması optik dalganın aktif bölge içinde sınırlandırılması kolaylaştırır (Şekil 2.10.b). Böylece oluşan fotonlar aktif bölge içinde yeni elektron-delik birleşmelerini daha kolay sağladıklarından eşik akımı çok eklemli yapılara göre daha küçük değerlerde elde edilir (Sağol 1998).



Şekil 2.10 a) GRIN SCH lazer yapısının enerji diyagramı b) GRIN SCH yapısının kırılma indisi değişimi ve aktif bölge içinde optik dalganın sınırlanması (Teke 1997)

2.3.1. Enerji düzeyleri

Kuantum kuyu lazerlerinde taşıyıcılar büyütme doğrultusunda sadece belirli enerji düzeylerinde bulunabilirler. İletim bandının n düzeydeki elektron ile değerlik bandının m düzeydeki deliğin yeniden birleşmesi sonucu oluşan fotonun enerjisi,

$$\hbar\omega = E_g + E_n + E_m \quad (2.3)$$

olarak verilmektedir. ω foton frekansı, E_g yasak enerji aralığı, E_n elektron enerji düzeyi, E_m delik enerji düzeyidir. Optik geçişler sonucu oluşan fotonun enerjisini yada frekansını bulabilmek için taşıyıcıların enerji düzeylerini ve dalga fonksiyonlarını elde etmek gerekir.

Kuantum kuyusundaki elektron durumları Schrödinger dalga denklemi ile,

$$\left[-\frac{\hbar^2 \nabla^2}{2m_e} + V(z) \right] \psi = E\psi \quad (2.4)$$

şeklinde ifade edilir. m_e elektron etkin kütlesi olup bu denklem etkin kütleinin tüm eksen ve doğrultularda aynı olduğu direk band aralığına sahip materyallerin iletim bandı için uygun bir eşitliktir. Kuantum kuyuları için yazılan Schrödinger eşitliği x , y ve z doğrultularında,

$$\Psi = \psi(x)\psi(y)\psi(z) \quad (2.5)$$

$$\frac{-\hbar^2}{2m_e} \frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} = E(x)\psi(x) \quad (2.6)$$

$$\frac{-\hbar^2}{2m_e} \frac{\partial^2 \psi(y)}{\partial y^2} = E(y)\psi(y) \quad (2.7)$$

$$\frac{-\hbar^2}{2m_e} \frac{\partial^2 \psi(z)}{\partial z^2} + V(z)\psi(z) = E(z)\psi(z) \quad (2.8)$$

şeklinde ayrılmaktadır. L_x ve L_y , x ve y doğrultularındaki boyutlar olmak üzere denklemin bu doğrultularındaki çözümleri,

$$\psi(x) = \frac{1}{\sqrt{L_x}} e^{ik_x x} ; E(x) = \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m_e} \quad (2.9) (2.10)$$

$$\psi(y) = \frac{1}{\sqrt{L_y}} e^{ik_y y} ; E(y) = \frac{\hbar^2 k_y^2}{2m_e} \quad (2.11) (2.12)$$

şeklinde ifade edilir. z doğrultusundaki çözümler ise sonlu ve sonsuz potansiyel kuyusu için elde edilebilir.

Genişliği W olan sonsuz potansiyel kuyusu içerisinde hareket eden elektron için Eşitlik 2.8 kullanılabilir. Potansiyelin, $V(z)$, sonsuz olması E enerjisindeki parçacığın kuyu dışında bulunamayacağı anlamındadır. Kuyu içerisinde potansiyel sıfır olduğundan Schrödinger dalga denklemi,

$$\frac{-\hbar^2}{2m_e} \frac{\partial^2 \psi(z)}{\partial z^2} = E(z)\psi(z) \quad (2.13)$$

şeklinde sadeleşir. Sınır koşullarından,

$$\psi(z) = 0 \quad ; \quad z = 0, W \quad (2.14)$$

olduğundan dalga fonksiyonu,

$$\psi(z) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{W}} \sin \frac{n\pi z}{W} \quad (2.15)$$

şeklinde bulunur. Enerji değerleri, n pozitif bir sabit olmak üzere,

$$E(z) = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2m_e W^2} \quad (2.16)$$

şeklinde kuantize değerler alır. Bu sonuç elektronun belirli enerji seviyelerine sahip olduğunu gösterir. Bu enerji değerleri kuyu genişliğine bağlı olduğundan, kuantum kuyusunu oluşturan dar band aralığına sahip materyalin MBE ve MOCVD gibi büyütme yöntemleriyle z doğrultusunda büyütme miktarının değiştirilmesi ile çeşitli enerji düzeyleri sağlanabilir. Bu durum farklı dalga boylarında ışımaya yapan kuantum kuyu lazerleri oluşturmak için oldukça önemlidir (Singh 1995).

W genişliğinde, V_0 potansiyeline sahip sonlu potansiyel kuyusu için ise enerji çözümleri analitik olmadığı için grafik metoduyla elde edilebilir. Kuyu içerisinde ve kuyu dışındaki dalga sayıları sırasıyla,

$$k_1 = \sqrt{\frac{2m_w E}{\hbar^2}} \quad (2.17)$$

$$k_2 = \sqrt{\frac{2m_b(V_0 - E)}{\hbar^2}} \quad (2.18)$$

olmak üzere Schrödinger dalga denklemi çözüldüğünde,

$$k_2 = \frac{m_b k_1}{m_w} \tan k_1 \frac{W}{2} \quad (2.19)$$

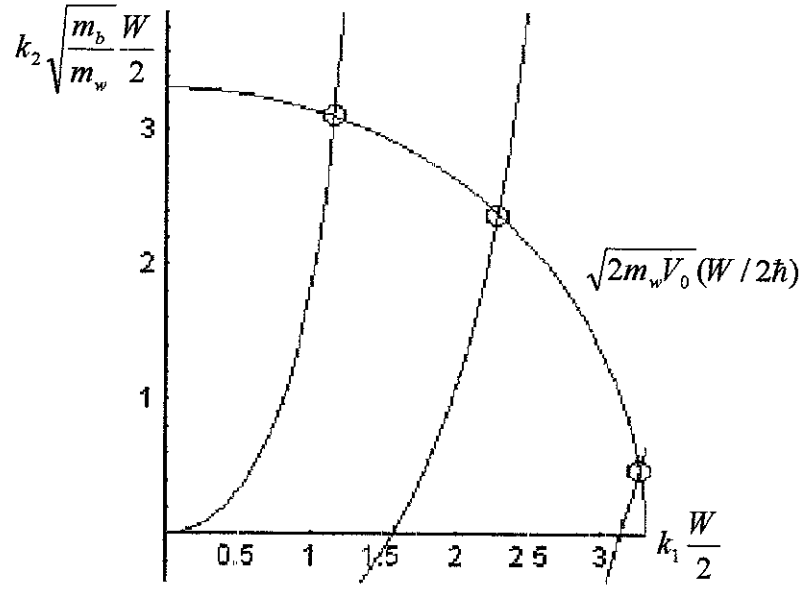
ve

$$k_2 = -\frac{m_b k_1}{m_w} \cot k_1 \frac{W}{2} \quad (2.20)$$

bağıntıları elde edilir. m_w ve m_b sırasıyla potansiyel kuyusunu ve engelini oluşturan materyaldeki elektronların etkin kütleleridir. 2.19 ve 2.20 denklemlerinin,

$$\left(k_1 \frac{W}{2}\right)^2 + \frac{m_w}{m_b} \left(k_2 \frac{W}{2}\right)^2 = \frac{2m_w V_0}{\hbar^2} \left(\frac{W}{2}\right)^2 \quad (2.21)$$

çember denklemiyle kesim noktaları enerji değerlerini vermektedir (Şekil 2.11).



Şekil 2 11. Sonlu potansiyel kuyusundaki enerji değerleri için grafiksel çözüm Kırmızı eğri Eşitlik 2.21'da verilen, mavi eğriler ise Eşitlik 2.19 ve Eşitlik 2.20'de verilen denklemleri ifade etmektedir (Hepburn 2001)

Kuantum kuyusunda değerlik bandındaki deliklerin enerji durumları ise band yapısının parabolik olmamasından dolayı karmaşıktır. Değerlik bandındaki ağır delik ve hafif delik enerji düzeylerini bulabilmek için Kohn-Luttinger Hamiltonyen çözümlerinden faydalanmak gerekir (Chuang 1991). Ağır delik ve hafif delik için Kohn-Luttinger Hamiltonyen ile Schrödinger denklemi,

$$\hat{H}\psi = \begin{bmatrix} H & M & N & 0 \\ M^* & L & 0 & N \\ N^* & 0 & L & -M \\ 0 & N^* & -M^* & H \end{bmatrix} \psi = E_m \psi \quad (2.22)$$

olarak verilir. H, L, M ve N değerleri,

$$H = -\frac{\hbar^2}{2m_0} \left[(k_x^2 + k_y^2)(\gamma_1 + \gamma_2) - (\gamma_1 - 2\gamma_2) \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] + V_{hh,lh} \quad (2.23)$$

$$L = -\frac{\hbar^2}{2m_0} \left[(k_x^2 + k_y^2)(\gamma_1 - \gamma_2) - (\gamma_1 + 2\gamma_2) \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] + V_{hh} \quad (2.24)$$

$$M = i \frac{\sqrt{3}\hbar^2}{2m_0} (-k_y - ik_x) \gamma_3 \frac{\partial}{\partial z} \quad (2.25)$$

$$N = -\frac{\sqrt{3}\hbar^2}{2m_0} \left[\gamma_2 (k_x^2 - k_y^2) - 2i\gamma_3 k_x k_y \right] \quad (2.26)$$

denklemleri ile bulunur. m_0 serbest elektron kütlesi; $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ Luttinger parametreleri, k_x ve k_y sırasıyla x ve y doğrultularındaki dalga vektörleri; V_{hh} ve V_{lh} ise ağır ve hafif delik alt band potansiyelleridir (Selmic vd 2001)

2.3.2. Durum yoğunluğu

Kuantum kuyusundaki taşıyıcıların hareketlerini tam olarak tanımlayabilmek için taşıyıcıların enerjisiyle ve yerleşim olasılığıyla değişen durum yoğunluğunu elde etmek gerekmektedir.

Potansiyel kuyusunun n enerji seviyesindeki durumları için durum yoğunluğu,

$$N(E) = \frac{m_e}{\pi\hbar^2} \quad (2.27)$$

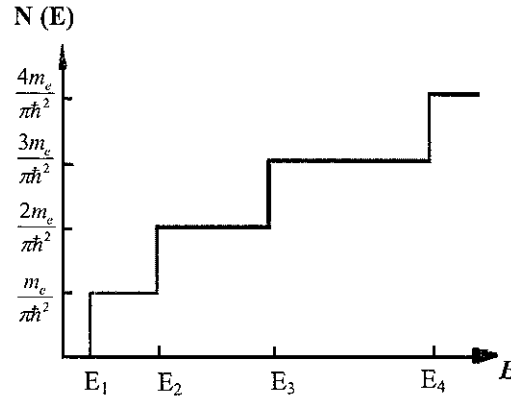
olarak bulunur. Buna göre, potansiyel kuyusunun her enerji seviyesindeki elektronların durum yoğunluğu enerjiden bağımsızdır. Bütün durumlara eşlik eden durum yoğunlukları toplamı,

$$N(E) = \frac{m_e}{\pi\hbar^2} \sum_n H(E - E_n) \quad (2.28)$$

olarak elde edilmektedir. H, Heaviside fonksiyonu olup,

$$H(x - a) = \begin{cases} 1 & x \geq a \\ 0 & x < a \end{cases} \quad (2.29)$$

olarak verilmektedir. Bütün durumlara eşlik eden yoğunluklar toplamı, Şekil 2.12'de görüldüğü gibi basamak fonksiyonu şeklinde gözlenir. Sürekli enerjiler aynı durum yoğunluğunda gerçekleşirken kuantize enerjiler bir çok durum yoğunluğuna sahiptir. Taşıyıcıların yüksek enerjilerden düşük enerjilere sabit durum yoğunluğunu izleyerek geçişleri çok daha kolay gerçekleşir. Ayrıca iki boyutlu sistemlerde band kenarında durum yoğunluğunun sıfırdan farklı olması düşük akımlarda nüfus terslenmesinin kolayca elde edilebilmesini sağlar



Şekil 2.12 İki boyutlu sistemde durum yoğunluğunun enerjiye bağlı değişimi (Singh 1995)

2.3.3. Fermi dağılım fonksiyonu

İletim bandındaki elektronların ve değerlik bandındaki deliklerin belirlenen enerji düzeylerinde bulunma olasılıkları, E_F Fermi seviyesi olmak üzere,

$$f(E) = \frac{1}{1 + \text{Exp}\left(\frac{E - E_F}{k_B T}\right)} \quad (2.30)$$

ile verilen Fermi-Dirac dağılım fonksiyonuyla ifade edilir. Fermi dağılımı, durum yoğunluğu ile birlikte, enerji düzeylerindeki durumların sayısını ve taşıyıcıların o durumlarda bulunma olasılığını vermektedir. $T=0K$ 'de tüm elektronlar değerlik

bandında bulunurken, sıcaklık arttıkça iletim bandında elektronun bulunma olasılığı artar. Elektronların iletim bandında bulunma olasılığı elektron-delik yeniden birleşmesi oranını etkilediği için önemlidir.

Yarıiletken lazerlerde, lazer operasyonu elektron ve delik Fermi fonksiyonlarının 0.5'den büyük olduğu yoğun katkılı eklemlerde gerçekleşir. Bu durumda Fermi seviyeleri elektronlar için Eşitlik 2.31'de, delikler için ise Eşitlik 2.32'de verilen Joyce-Dixon (1977) yaklaşımına göre bulunabilir.

$$E_{f_e} = k_B T \left[\ln \frac{n}{N_c} + \frac{1}{\sqrt{8}} \frac{n}{N_c} - \left(\frac{3}{16} - \frac{\sqrt{3}}{9} \right) \left(\frac{n}{N_c} \right)^2 + \dots \right] \quad (2.31)$$

$$E_{f_h} = k_B T \left[\ln \frac{p}{N_v} + \frac{1}{\sqrt{8}} \frac{p}{N_v} - \left(\frac{3}{16} - \frac{\sqrt{3}}{9} \right) \left(\frac{p}{N_v} \right)^2 + \dots \right] \quad (2.32)$$

n ve p taşıyıcı yoğunlukları olup, N_c ve N_v etkin durum yoğunluklarını ifade eder.

2.3.4. Kazanç hesapları

Kuantum kuyu lazerleri düşük eşik akımlarda yüksek kazanç sağlayan yarıiletken lazerlerdir. Kuantum kuyu lazerlerinde iletim bandının n. enerji seviyesindeki elektronu ile değerlik bandının m. enerji seviyesindeki deliği için kazanç,

$$g_{nm}(\hbar\omega) = \frac{\pi e^2 \hbar}{n_r c m_0^2 W \epsilon_0 (\hbar\omega)} N_{nm}(\hbar\omega) |M_{nm}|^2 [f(E_{f_n}) + f(E_{f_m}) - 1] \quad (2.33)$$

olarak verilir (Chinn vd 1988). N_{nm} durum yoğunluğu fonksiyonu olup Bölüm 2.3.2'de belirtildiği gibi basamak fonksiyonu şeklindedir. e elektron yükü, n_r kırılma indisi, c ışığın boşluktaki hızı, m_0 serbest elektron kütlesi, W kuyu genişliği, ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti, ω foton frekansdır. $f(E_{f_n})$ ve $f(E_{f_m})$ sırasıyla elektronun ve deliğin Fermi fonksiyonlarını ifade eder. M_{nm} , momentum matris elemanı olup kuantum kuyu

yapılarında elektron ve foton arasındaki etkileşimler ışığın polarizasyonuna bağlı olarak değiştiği için oldukça karmaşıktır ve bu çalışmanın kapsamı içinde incelenmemiştir.

2.3.5. Türevsel kuantum verimliliği

Lazer diyotlarda çıkış gücünü artırmak için lazere gönderilen akımın tümünün aktif bölgede elektron-delik yeniden birleşmesini sağlaması istenir. Fakat gönderilen akımın iç kuantum verimliliği, η_i , olarak tanımlanan sadece bir kısmı ışımaya oluşturan taşıyıcıların oluşumunu sağlar. Lazere gönderilen elektronların zamana göre değişimi,

$$\frac{dN}{dt} = G - R \quad (2.34)$$

şeklinde ifade edilir. G aktif bölgeye gönderilen elektronların oranını olup; I akım değeri, e elektron yükü ve V aktif bölge hacmi olmak üzere,

$$G = \frac{\eta_i I}{eV} \quad (2.35)$$

bağıntısıyla elde edilir. R aktif bölgede birim hacimde yeniden birleşen elektron oranı olup kendiliğinden salınım oranı (R_{sp}), ışımsız yeniden birleşim oranı (R_{nr}), taşıyıcı sızıntı oranı (R_l) ve uyarılmış salınım oranı (R_{st}) toplamına eşittir.

$$R = R_{sp} + R_{nr} + R_l + R_{st} \quad (2.36)$$

Lazer diyotların L-I karakteristikleri incelenirken öncelikle eşik akım değeri altındaki durum için elektronların değişimine bakılır. Durgun durumda ($dN/dt=0$) gönderilen elektronların oranı yeniden birleşen elektronların oranına eşit olacağından 2.35 ve 2.36 denklemlerinden,

$$\frac{\eta_i I_{th}}{eV} = (R_{sp} + R_{nr} + R_l)_{th} \quad (2.37)$$

elde edilir. Burada gönderilen akımın tümü eş fazlı foton oluşturmayan yeniden birleşmeler için harcanmaktadır. Eşik akım değeri üzerinde ise elektronların zamana göre değişimi,

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\eta_i(I - I_{th})}{eV} - V_g g N_p \quad (2.38)$$

şeklinde elde edilir. Uyarılmış salınım sonucunda oluşan foton yoğunluğu değişimi, foton yoğunluğunun (N_p), foton akış hızının (V_g) ve kazancın (g) çarpımı şeklinde verilir. Durgun durumda ise foton yoğunluğu,

$$N_p = \frac{\eta_i(I - I_{th})}{eVgV_g} \quad (2.39)$$

olur. Lazerin çıkış gücünü hesaplayabilmek içinse α_i ortalama iç kayıplar, α_m ise ayna kayıpları olmak üzere,

$$P = \frac{\alpha_m}{\alpha_i + \alpha_m} h\nu V_g g N_{ph} \quad (2.40)$$

bağıntısından faydalanılır. Eşitlik 2.39'da elde edilen foton yoğunluğu ifadesi Eşitlik 2.40'da yerine yazılırsa, türevsel kuantum verimliliği,

$$\eta_d = \frac{\eta_i \alpha_m}{\alpha_i + \alpha_m} \quad (2.41)$$

olmak üzere çıkış gücü ,

$$P = \eta_d h\nu \frac{(I - I_{th})}{e} \quad (2.42)$$

olarak elde edilir. Buradan türevsel kuantum verimi,

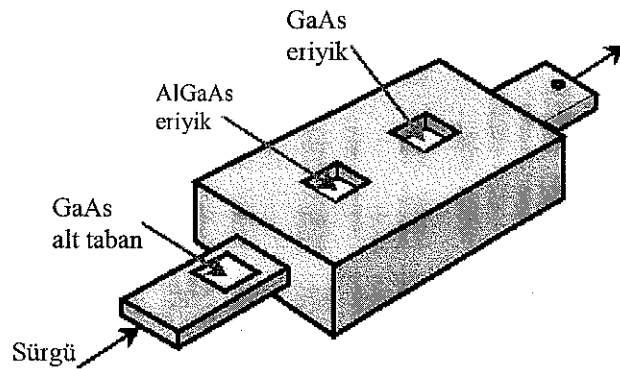
$$n_d = \frac{e \Delta P}{h \nu \Delta I} \quad (2.43)$$

şeklinde bulunur (Coldren ve Corzine 1995)

2.4. Yarıiletken Lazer Oluşturma Yöntemleri

2.4.1. Sıvı faz epitaksisi (Liquid phase epitaxy-LPE)

Yarıiletken büyütme teknolojisinde ilk kullanılan tekniklerden biri olan LPE, yeni teknolojiler üretildikçe daha az tercih edilir olmuştur. Bu teknikte alt taban kuvars yada grafit sürgü içine koyulur. Sürgü itilerek alt taban üzerine büyütülecek kristalin eriyiği kaplanır. Şekil 2.13'de bu teknikle AlGaAs ve GaAs yapılarının büyütülmesi gösterilmektedir. Bu tekniğin kullanımı birbiriyle karışması zor metal alaşımlarda oldukça güçtür. LPE ile ara yüzeyi 10-20Å olan yapılar elde edilebilir.

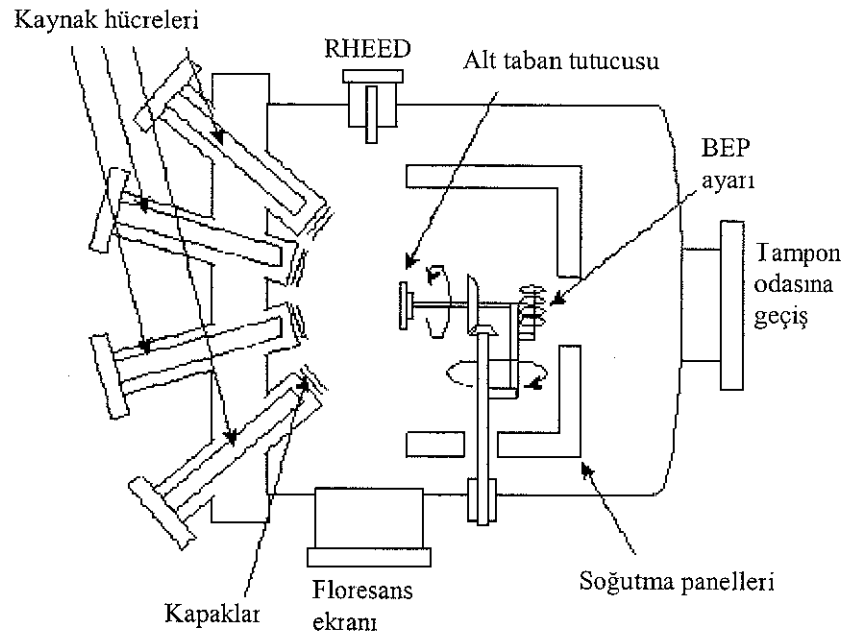


Şekil 2.13. AlGaAs ve GaAs yapılarının LPE tekniğiyle büyütülmesi (Singh 1995)

2.4.2. Moleküler demet epitaksisi (Molecular beam epitaxy-MBE)

MBE büyütme oranının saniyede birkaç angström (Å) mertebesinde olduğu yüksek hassasiyette yarıiletken yapı üretmek için geliştirilen bir tekniktir. Yüksek kalitede katmanlı yapı oluşturabilmek için kaynak element mümkün olduğunca saf olmalı ve büyütme işlemi çok yüksek vakum ortamında ($\sim 10^{-11}$ torr) gerçekleştirilmelidir. MBE

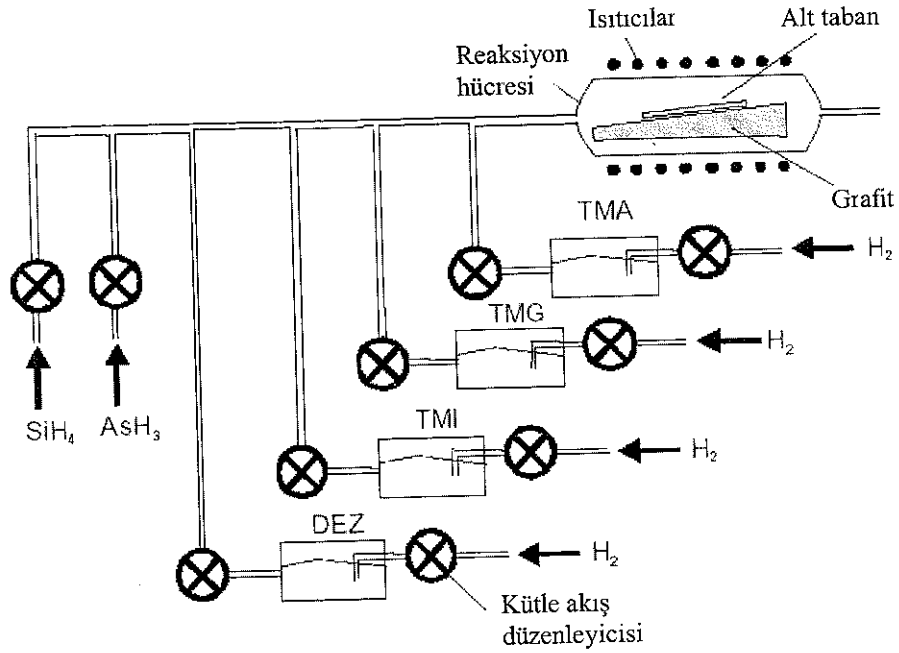
sisteminin temeli yarıiletken malzemeyi oluşturan molekülün bileşenlerinin (Ga, Al, As gibi) bir alt taban üzerine demet şeklinde gönderilerek biriktirilmesine dayanır. Moleküller demet, kaynak hücrelerinde bulunan molekül bileşenlerinin arzu edilen malzeme akısı elde edilinceye kadar ısıtılması ile elde edilir. Molekül bileşenleri bilgisayarla kontrol edilen kaynak hücrelerinden belirli zamanlarda vakum ortamındaki alt taban üzerine gönderilerek büyütme yapılır. Hangi materyalin büyütüleceği kaynak hücrelerinin önündeki kapaklar açılıp kapatılarak kontrol edilebilir. Örneğin Al kaynağın önündeki kapağın kapatılması fakat Ga ve As kaynaklarının önündeki kapakların açılmasıyla GaAs tabakası büyütülür. Farklı yarıiletken malzeme kaynakları kullanılarak farklı yapıların büyütülmesi sağlanabilir. MBE sistemi, büyütme odası, tampon odası, yükleme odası olmak üzere üç ana vakum odasından oluşur. Yükleme odası, numunenin vakum odasına getirilmesinde ve vakum odasından çıkarılmasında; tampon odası, numunenin hazırlanmasında ve saklanmasında; büyütme odası (Şekil 2.14) ise numunenin büyütülmesinde kullanılır. Büyütme oranının kontrolü için demet eşdeğer basınç (Beam Equivalent Pressure-BEP) ayar metodu veya yansımali yüksek enerjili elektron kırınımı (Reflection High Energy Electron Diffraction-RHEED) gibi dahili teknikler kullanılır.



Şekil 2.14 MBE sisteminde büyütme odası (Singh 1995)

2.4.3. Metal organik kimyasal buhar çökeltmesi (Metal organic chemical vapour deposition-MOCVD)

Yüksek kalitede katmanlı yapı oluşturabilmek için geliştirilen diğer bir teknik Şekil 2.15’de gösterilen MOCVD sistemidir. MOCVD’nin temeli büyütmenin ısıtılmış alt taban yüzeyinde oluşan kimyasal reaksiyonlara dayanmasıdır. Alt taban reaksiyon hücresi içerisindeki grafit bloğun üzerine konarak ısıtılır. Sıcaklık büyütülen bileşiğin yapısına bağlı olarak 500°C ile 700°C arasında değişir. Büyütmenin 100-700 Torr arasındaki basınç değerlerinde gerçekleşiyor olması bu tekniğin en önemli avantajıdır. Katmanlı yapıyı oluşturmak için sıcak alt taban ile bağlantı halinde bulunan organik bileşikler ayrıştırılırlar. Ga için $Ga(CH_3)_3$ (TMG), arsenik için AsH_3 , alüminyum için $Al(CH_3)_3$ (TMA), indiyum için $In(CH_3)_3$ (TMI), silisyum için SiH_4 ve çinko için $Zn(C_2H_5)_2$ (DEZ) bileşikleri kullanılır (Uji vd 1981). Gaz akışı kontrolü ise kütle akış düzenleyicileri tarafından sağlanmaktadır.



Şekil 2.15. MOCVD sistemi (Hepburn 2001)

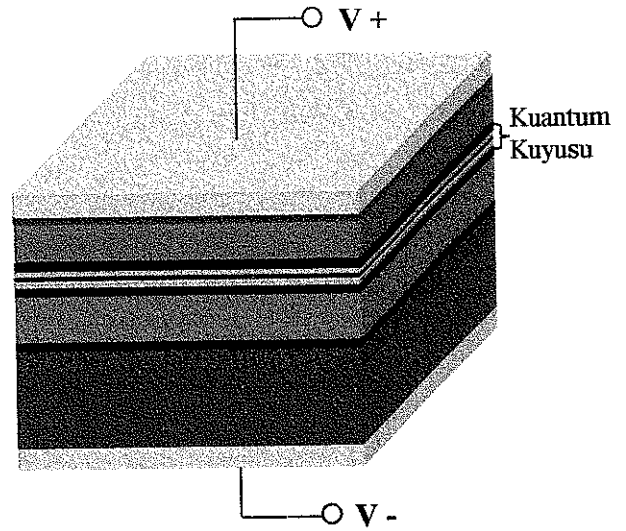
3. MATERYAL ve METOT

3.1. Materyal

3.1.1. Kuantum kuyu lazeri yapısı

Çalışmada kullanılan kuantum kuyu lazeri John Roberts tarafından metal organik kimyasal buhar çökeltmesi tekniği kullanılarak Sheffield Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Fakültesi, EPSRC III-V Yarıiletken Teknolojileri İçin Ulusal Merkez'de büyütülmüştür. Bu tekniğin ayrıntıları Bölüm 2.4.3'de verilmektedir.

- Gümüş kontaklar
- p-GaAs
- p- $\text{Al}_{0.58}\text{Ga}_{0.42}\text{As}$
- Eğimli indis tabakası
- $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$
- $\text{In}_{0.09}\text{Al}_{0.17}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$
- $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$
- Eğimli indis tabakası
- n- $\text{Al}_{0.58}\text{Ga}_{0.42}\text{As}$
- Eğimli indis tabakası
- n-GaAs (Tampon tabakası)
- n-GaAs (Alt taban)



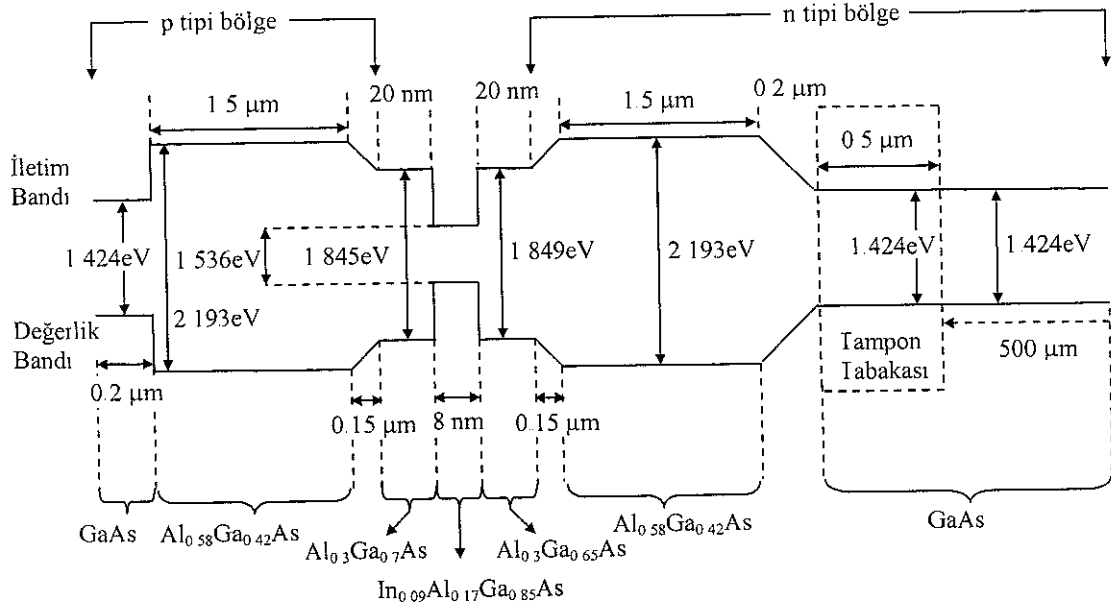
Şekil 3.1. Kuantum kuyu lazerin yapısı

Kuantum kuyu lazerinin Şekil 3.1'de gösterilen yapısı oluşturulurken ilk olarak 500 μm genişliğinde GaAs alt taban ve üzerine AlGaAs yapısıyla örgü uyumunu uygun biçimde sağlamak amacıyla ara yüzey olarak 0.5 μm genişliğinde n tipi GaAs tampon tabakası kullanılmıştır. Tampon tabakası üzerine 0.2 μm genişliğinde eğimli indis tabakası ve 1.5 μm genişliğinde n tipi $\text{Al}_{0.58}\text{Ga}_{0.42}\text{As}$ yapısı büyütülmüştür. Kuantum kuyusu 8 nm genişliğinde $\text{In}_{0.09}\text{Al}_{0.17}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ yapısının, 20 nm genişliğinde $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ yapısı ve 20 nm genişliğinde $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ yapısının sarılmasıyla oluşturulmuştur. Kuyu çevresinde taşıyıcıları yakalama verimini artırmak için 0.15 μm genişliğinde eğimli indis tabakaları kullanılmıştır. AlGaAs katmanındaki alüminyum konsantrasyonunun değiştirilmesi ile aktif bölge sınırlarının şekillendirilmesi ve böylece

kuantum kuyusunun değişken kırılma indisli katman ile sınırlanması sağlanmaktadır. Bu durum, kuyularda taşıyıcı yoğunluğunu arttırdığı gibi fotonların kuyu içerisinde sınırlandırılmasına da sebep olur. Böylece fotonlar yeni elektron-delik birleşmeleri sağlayarak düşük eşik akım değerlerinde de güçlü ışımaya oluşmasını sağlarlar. Kuantum kuyu yapısının üzerine ise 1.5 μm genişliğinde p tipi $\text{Al}_{0.58}\text{Ga}_{0.42}\text{As}$ yapısı ve 0.2 μm genişliğinde GaAs yapısı büyütülmüştür. Yapıya elektriksel bağlantı sağlamak amacıyla gümüş kontak uygulanmıştır.

3.1.2. Kuantum kuyu lazerinin enerji diyagramının oluşturulması

$\text{In}_{0.09}\text{Al}_{0.17}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ tek kuantum kuyu lazerini oluşturan yapıların enerji aralıkları hesaplanmış ve büyütme doğrultusu boyunca iletim bandı, yasak enerji aralığı ve değerlik bandını gösteren enerji diyagramı oluşturulmuştur (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Kuantum kuyu lazerinin enerji diyagramı

GaAs yapısından oluşan alt taban ve tampon tabakası 1.424 eV yasak enerji aralığına sahiptir (Fiedler ve Schlachetzki 1987). $Al_xGa_{1-x}As$ yapısının oda sıcaklığındaki enerji aralığı,

$$E_g(x) = 1.424 + 1.594x + x(1-x)(0.127 - 1.31x) \text{ eV} \quad (3.1)$$

bağıntısıyla bulunur (Li 2000). Eğimli indis tabakası üzerinde bulunan $Al_{0.58}Ga_{0.42}As$ yapısının oda sıcaklığındaki enerji aralığı Eşitlik 3.1 kullanılarak 2.193 eV olarak bulunmuştur. $In_{0.09}Al_{0.17}Ga_{0.85}As$ yapısını sararak kuantum kuyusunu oluşturan $Al_{0.3}Ga_{0.65}As$ ve $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ yapılarının enerji aralıkları ise aynı eşitlik kullanılarak sırasıyla 1.849 eV ve 1.845 eV olarak elde edilmiştir. $In_xAl_yGa_{1-x-y}As$ yapısının oda sıcaklığındaki enerji aralığı Hirayama vd (1993) tarafından,

$$E_g(x, y) = 1.424 + 1.455y + 0.191y^2 - 1.614x + 0.55x^2 + 0.043xy \text{ eV} \quad (3.2)$$

olarak ve $In_x(Al_yGa_{1-y})_{1-x}As$ yapısının oda sıcaklığındaki enerji aralığı ise Jensen vd (1999) tarafından,

$$E_g(x, y) = 1.519 + 1.36y - 1.584x + 0.55xy + 0.22y^2 + 0.475x^2 \text{ eV} \quad (3.3)$$

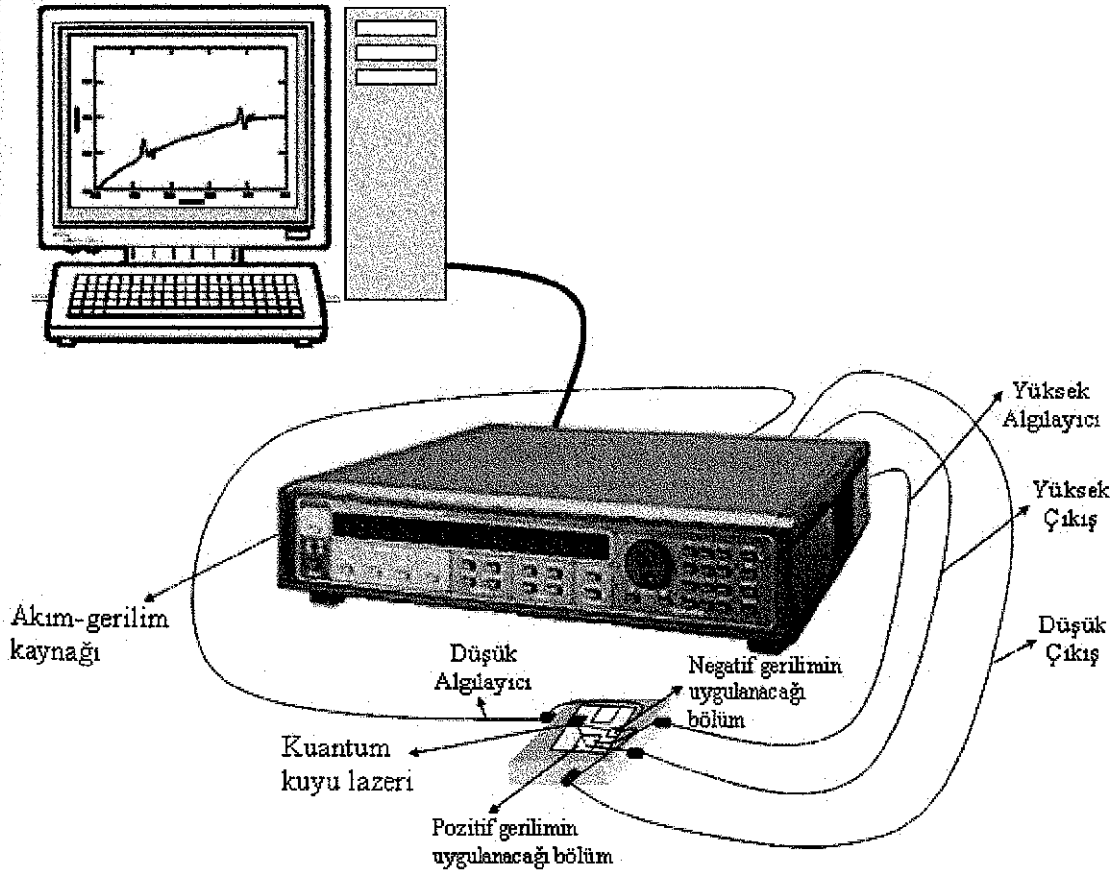
olarak belirlenmiştir. $In_{0.09}Al_{0.17}Ga_{0.85}As$ yapısının oda sıcaklığında yasak enerji aralığı ise Eşitlik 3.2'den faydalanılarak 1.536 eV olarak hesaplanmıştır. Bu değer $Al_{0.3}Ga_{0.65}As$ yapısının enerji aralığının 1.849 eV ve $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ yapısının 1.845 eV olarak hesaplanan değerlerinden daha küçük olması sayesinde taşıyıcıların iletim bandı altında ve değerlik bandı üstünde sınırlandırılmasını sağlayan potansiyel kuyusu oluşturulmuştur.

3.2. Metot

3.2.1. Akım-gerilim (I-V) ölçümleri

3.2.1.1. Deney düzeneği

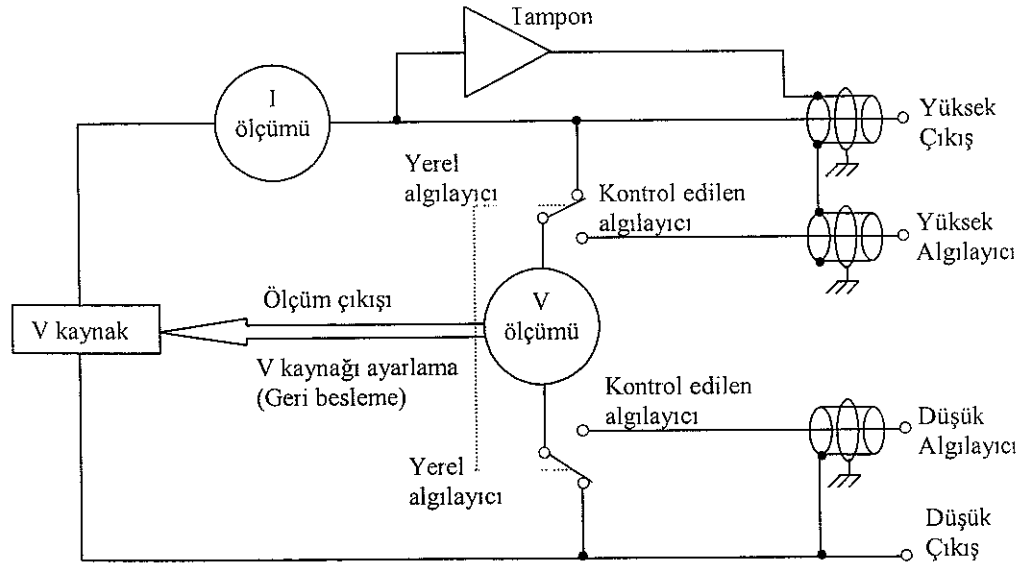
I-V ölçümleri oda sıcaklığında akım-gerilim kaynağı (Keithley 236) kullanılarak yapılmıştır. I-V ölçümleri için deneysel düzenek Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Kuantum kuyu lazeri ile akım-gerilim kaynağı arasındaki bağlantı, akım gerilim kaynağının yüksek çıkışının ve yüksek algılayıcısının kuantum kuyu lazerinin Şekil 3.1'de gösterilen +V ucuna, düşük çıkışının ve düşük algılayıcısının ise -V ucuna bağlanmasıyla sağlanır



Şekil 3.3. I-V ölçüm düzeneği

Kuantum kuyu lazerinin I-V karakteristiğinin elde edilmesi için akım-gerilim kaynağı, uygulanan gerilime karşı akım ölçümü yapılacak şekilde kullanılmıştır. Bu ölçüm tekniğinin detaylı gösterimi Şekil 3.4'de verilmiştir. Ölçümün yapılabilmesi için ampermetre (I ölçümü), voltaj kaynağı ile yüksek çıkış arasına bağlanır. Bu durumda akım-gerilim kaynağı, düşük direnç özelliğinde akım ölçme kapasitesine sahip voltaj kaynağı olarak çalışır. Algılayıcılar ise çıkış voltajını denetlemek ve gerektiğinde giriş voltajını ayarlamak için kullanılır. Voltmetre (V ölçümü) çıkıştaki veya algılayıcıdaki voltajı ölçer ve programlanan voltaj ile karşılaştırır. Eğer ölçülen voltaj değeri programlanan voltaj değeri ile aynıysa, kaynak voltajı değişmez. Fakat ölçülen voltaj değeri programlanan voltajdan daha düşükse, algılayıcı voltajı programlanan voltaja eşit oluncaya kadar çıkış voltajı artar. Böylece algılayıcılar örnek üzerindeki voltajın daima programlanan voltaj değerinde olmasını sağlar. Tampon devresi ise çıkışta oluşabilecek sızıntı akımlarının etkisini engellemek için kullanılmaktadır.

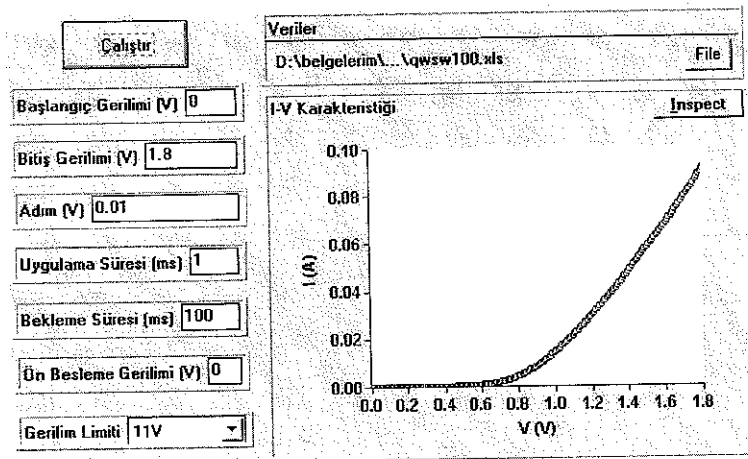
Elde edilen verilerin bilgisayara aktarılması TestPoint yardımıyla hazırlanan program ile sağlanmıştır.



Şekil 3.4 Akım-gerilim kaynağının uygulanan gerilime karşı akım ölçümü yapacak şekilde kullanımının gösterilmesi

3.2.1.2. I-V ölçümleri için hazırlanan program

Kuantum kuyu lazerinin I-V karakteristiğinin belirlenmesi için TestPoint kullanılarak hazırlanan programın temeli, örneğe düzgün artan değerlerde gerilim uygulanıp örnek üzerinden geçen akımın ölçümüne dayanır. Oluşturulan programın ekran görüntüsü Şekil 3.5’de gösterilmiştir. Örneğe uygulanacak gerilim ‘başlangıç gerilimi’ ve ‘bitiş gerilimi’ değerleri arasında değişmektedir. Program çalıştırıldığı anda başlama gerilimi ‘uygulama süresi’ verisi süresince uygulanır Gerilim uygulandığı anda örnek üzerinden geçen akım okunur ve kaydedilir. Lazerin Joule ısısına maruz kalmaması için ‘bekleme süresi’ verisi süresince gerilim uygulanmaz ve örnek soğutulur ‘Adım’ verisi kadar uygulanacak gerilim artırılır ve tekrar örnek üzerinden geçen akım okunur. Bu işlem bitiş gerilimine kadar devam eder. ‘Gerilim limiti’ uygulanacak maksimum voltaja göre 1.1 V ile 110 V arasında değişmektedir. Ön besleme gerilimi, gerilim limiti değerini aşmayacak şekilde uygulanabilir. Hazırlanan program doğrultusunda, kuantum kuyu lazerine 0 V’dan 1.8 V’a kadar 10 Hz frekansında 1 ms’lik darbeler, sırasıyla 0.01 V, 0.02 V, 0.05 V adımlar kullanılarak uygulanmış ve örnek üzerinden geçen akım okunmuştur. Ayrıca örnek 0-1.8 V arasında 0.01 V adımlarla 1 Hz, 5 Hz ve 10 Hz frekansında 1ms’lik darbelerle uyarılarak ölçüm alınmıştır. Veriler oluşturulan program yardımıyla bilgisayara kaydedilip grafiğe dönüştürülmüştür I-V ölçümleri için yazılan program Ek-1’de verilmektedir.

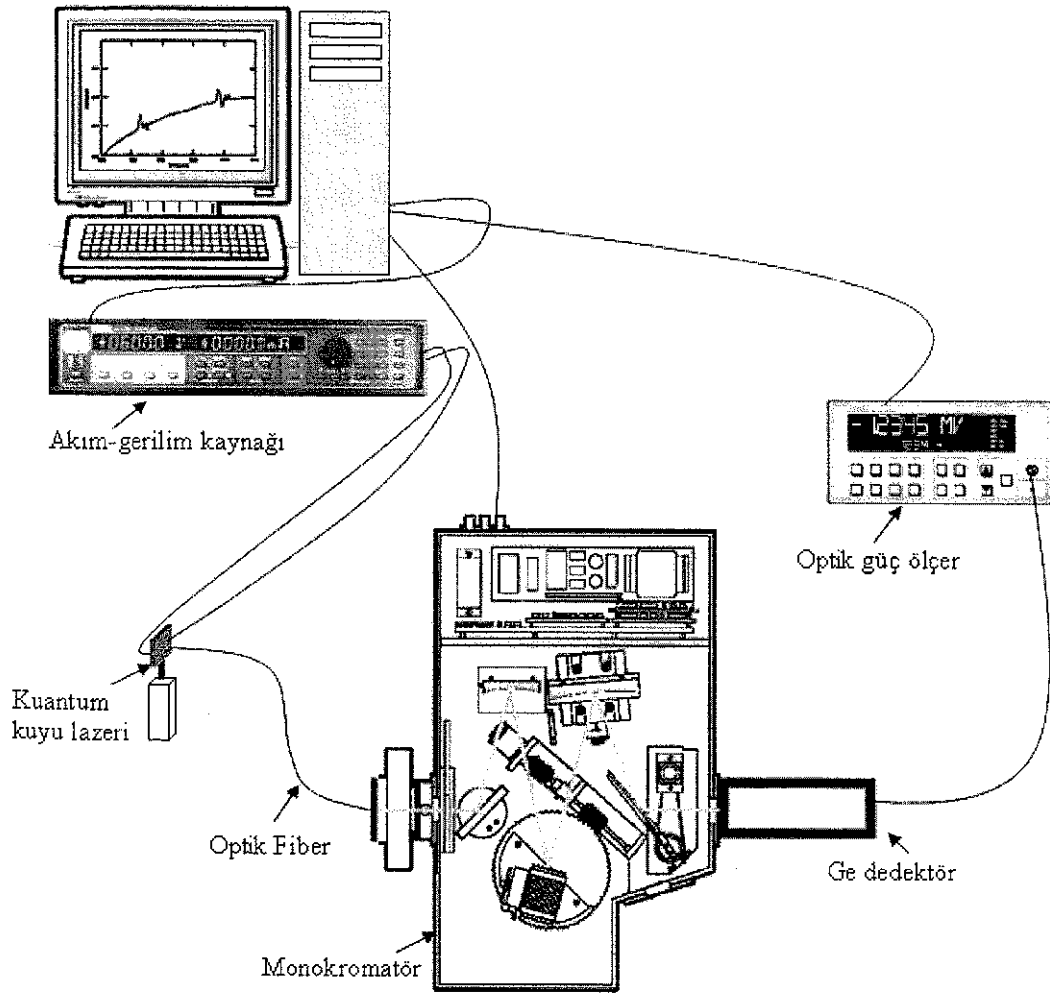


Şekil 3.5 I-V ölçümleri için kullanılan programın ve grafiğe dönüştürülmüş bir verinin ekran görüntüsü

3.2.2. Elektrolüminesans (EL) ölçümleri

3.2.2.1. Deney düzeneği

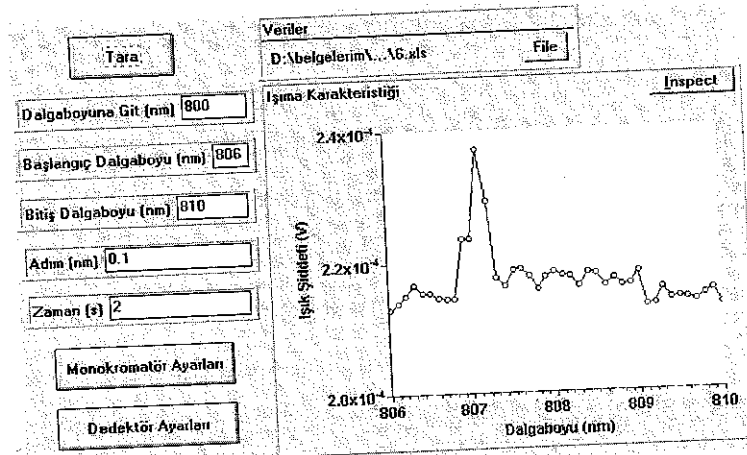
EL ölçümleri oda sıcaklığında Şekil 3.6'da gösterilen deneysel düzenek kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kuantum kuyu lazeri, akım-gerilim kaynağı ile I-V ölçümleri sonucunda belirlenen eşik gerilim değeri üzerinde gerilim uygulanarak uyarılmıştır. Örneğin oluşturduğu ışıma optik fiber ile monokromatöre (Oriol-MS257TM 77700) odaklanmıştır. Ge dedektörde (Thermo Oriol-70339) elde edilen verilerin optik güç ölçer (Oriol-70310) ile bilgisayara aktarılması ve değerlendirilmesi TestPoint yardımıyla hazırlanan program ile sağlanmıştır.



Şekil 3.6. EL ölçüm düzeneği

3.2.2.2. EL ölçümleri için hazırlanan program

Kuantum kuyu lazerinin ışınma verilerinin alınması için TestPoint kullanılarak hazırlanan program uyarılmış örnek üzerinden salınan ışınmanın istenilen dalgaboyu aralığında belirlenmesini sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Oluşturulan programın ekran görüntüsü Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Başlangıç ve bitiş dalgaboyu değerleri 'başlangıç dalgaboyu' ve 'bitiş dalgaboyu' verilerine göre değiştirilerek istenilen dalgaboyu aralığında tarama yapılabilir. 'Adım' verisi en az 0.1 nm olup tarama sırasında dalgaboyu artışı belirler. Monokromatör ayarları düğmesi ile monokromatörün yarık, grating, filtre ayarları; dedektör ayarları düğmesi ile dedektörün güç, güç aralığı, AC-DC modu, tampon ayarları istenilen değerlerde değiştirilebilir. Kuantum kuyu lazeri I-V ölçümleri sonucunda belirlenen eşik gerilim değeri üzerindeki 2 V değerinde gerilim uygulanarak uyarılmıştır. Örneğin oluşturduğu ışınma 806-810 nm dalgaboyu aralığında 0.1 nm'lik adımlarla belirlenmiştir. Elde edilen veriler oluşturulan program ile grafiğe dönüştürülmüştür. EL ölçümleri için kullanılan program Ek-2'de ayrıntılı olarak verilmektedir.



Şekil 3.7 EL ölçümleri için kullanılan programın ve grafiğe dönüştürülmüş bir verinin ekran görüntüsü

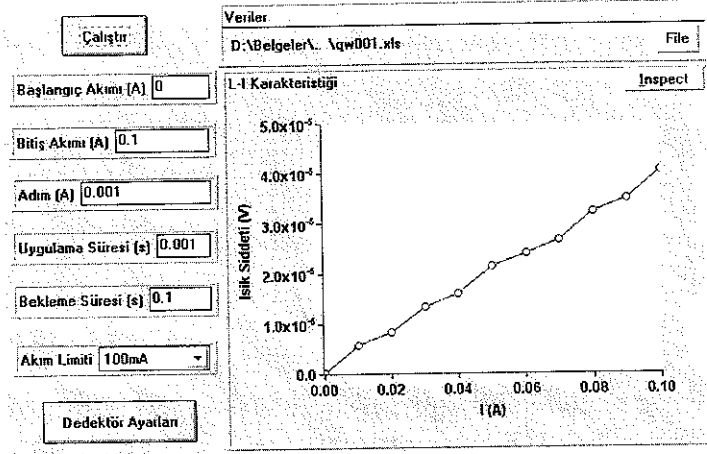
3.2.3. Optik güç-akım (L-I) ölçümleri

3.2.3.1. Deney düzeneği

L-I ölçümleri oda sıcaklığında Şekil 3 6'da gösterilen deneysel düzenek kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Akım-gerilim kaynağı kuantum kuyu lazerine uygulanacak akım değerini belirlemek için kullanılmıştır. Uygulanan akım değerlerinde lazerin oluşturduğu ışıma optik fiber ile monokromatöre (Oriol-MS257TM 77700) odaklanır. Ge dedektörde (Thermo Oriol-70339) elde edilen veriler optik güç ölçer (Oriol-70310) ile bilgisayara aktarılır. Verilerin kaydedilmesi ve değerlendirilmesi TestPoint kullanılarak hazırlanan program ile sağlanır

3.2.3.2. L-I ölçümleri için hazırlanan program

L-I ölçümleri için hazırlanan programın temeli, örneğe uygulanan akım sonucunda lazerin oluşturduğu ışımanın belirlenmesine dayanır. Örneğe uygulanacak akım 'başlangıç akımı' verisine göre belirlenip 'uygulama süresi' verisi süresince uygulanır. Uygulanan akım değerinde örneğin oluşturduğu ışıma optik güç ölçerle okunarak kaydedilir 'Bekleme süresi' verisi süresince akım uygulanmadan beklenildikten sonra 'adım' verisi doğrultusunda akım artışı sağlanıp tekrar ışıma ölçümü alınır ve kaydedilir 'Bitiş akımı' verisine kadar bu işlem devam eder 'Akım limiti' uygulanacak maksimum akımı belirleyip 100 μ A ile 100 mA arasında değişir. Akım-gerilim kaynağından kuantum kuyu lazerine 0-0.1 A arasında 0.01 A adımlarla akım uygulanarak örneğin oluşturduğu ışıma belirlenmiştir. Elde edilen veriler oluşturulan program ile grafiğe dönüştürülmüştür L-I ölçümleri için kullanılan program Ek-3'de ayrıntılı olarak verilmektedir.



Şekil 3 8 L-I ölçümleri için kullanılan programın ve grafiğe dönüştürülmüş bir verinin ekran görüntüsü

Sonuçların test edilmesi için I-V, EL ve L-I ölçümleri ayrıca örneğin sağlandığı Essex Üniversitesi Optoelektronik Maddeler ve Aygıtlar Laboratuvarı'nda yapılmıştır. I-V ölçümlerinde örneğe 0-1.8 V arasında gerilim uygulanarak örnek üzerinden geçen akım okunmuştur. EL ölçümlerinde örnek 6.5 V değerinde gerilimle uyarılarak 804-814 nm dalgaboyu aralığında ışımaya bakılmıştır. L-I ölçümlerinde ise örneğe 0-750 mA arasında akım uygulanmış ve örneğin oluşturduğu ışımaya belirlenmiştir.

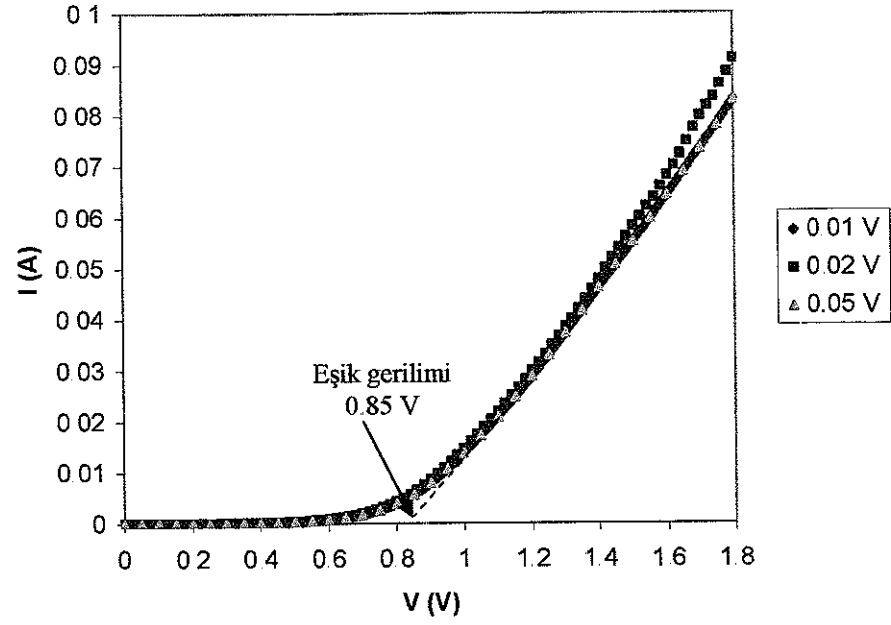
4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. I-V Ölçümleri

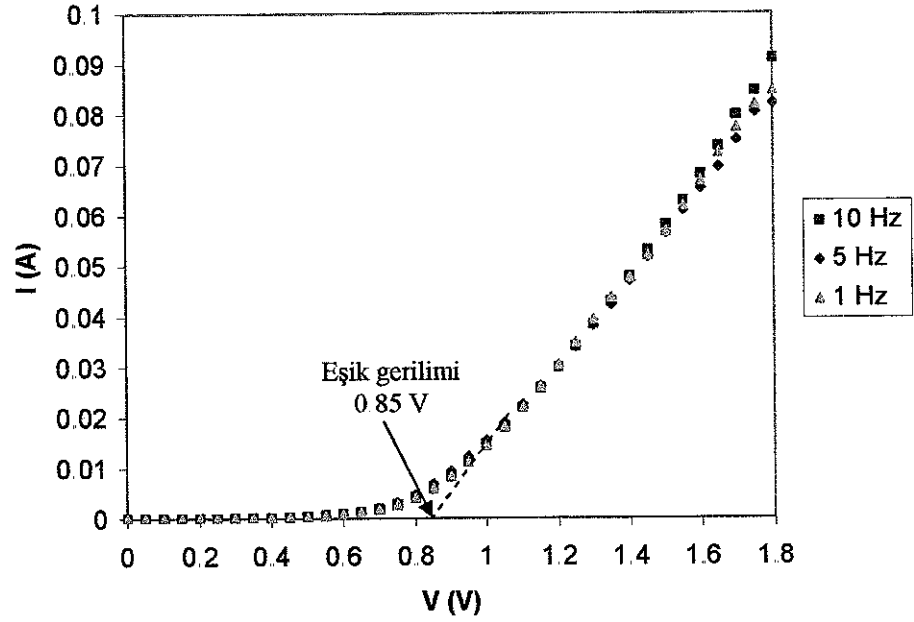
Yarıiletken lazerler, p-n ekleminden oluştukları için, tipik bir diyot gibi akım-gerilim özelliği göstermeleri beklenir. I-V karakteristiği örneğe uygulanan gerilime karşı örnek üzerinden geçen akımın değişimini gösterir. Lazer diyotlarda I-V karakteristiği iki farklı bölgeye sahiptir. Eşik geriliminden düşük gerilim değerlerinde düşük akımlar elde edilirken, eşik gerilim değerinden yüksek gerilim değerlerinde taşıyıcı yoğunluğunun artmasından dolayı akım eğrisi ani bir artış gösterir ve yüksek akımlara ulaşılır. I-V ölçümleri sonucunda eşik gerilimi ve seri direnç gibi aygıtın elektronik özellikleri belirlenir.

Çalışmada kullanılan kuantum kuyu lazerlerinin oda sıcaklığındaki I-V karakteristikleri örneğe 0-1.8 V arasında sırasıyla 0.01 V, 0.02 V ve 0.05 V gerilim artışı kullanılarak 10 Hz frekansında 1 ms'lik darbelerin uygulanmasıyla elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.1'de gösterilmiş ve kuantum kuyu lazerinin eşik gerilim değeri 0.85 V olarak bulunmuştur. Örneğe farklı gerilim artışları uygulanması sonucunda eşik geriliminde değişiklik gözlenmemiştir. Kuantum kuyu lazerinin seri direnci hesaplanırken elde edilen sonuçlar içerisinde en hassas veri olan örneğe 0-1.8 V arasında 0.01 V adımlarla 10 Hz frekansında 1 ms'lik darbelerin uygulanmasıyla elde edilen veri kullanılmıştır.

Ayrıca örnek 0-1.8 V arasında 0.01 V adımlarla 1 Hz, 5 Hz ve 10 Hz frekansında 1 ms'lik darbelerle uyarılarak ölçüm alınmıştır. Kuantum kuyu lazerinin oda sıcaklığında farklı frekanslarda darbeler uygulanmasıyla elde edilen I-V karakteristikleri Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Ölçümler sonucunda eşik gerilim değerinde bir değişiklik gözlenmemiştir.

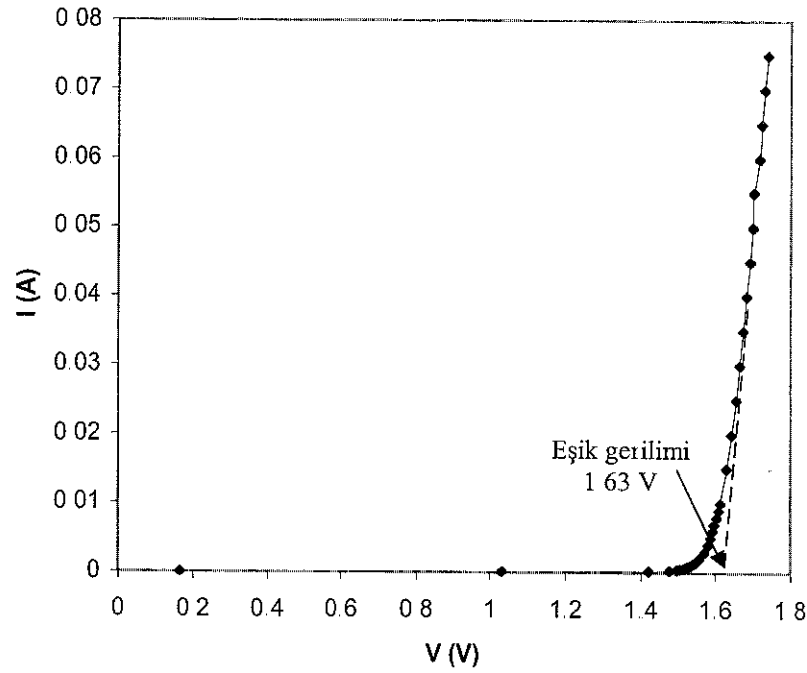


Şekil 4.1. Kuantum kuyu lazerinin oda sıcaklığındaki farklı gerilim artışları uygulanarak elde edilen I-V karakteristikleri

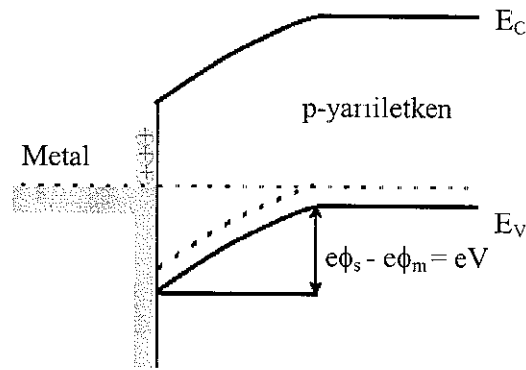


Şekil 4.2. Kuantum kuyu lazerinin oda sıcaklığındaki farklı frekanslarda darbeler uygulanmasıyla elde edilen I-V karakteristikleri

Çalışmada kullanılan kuantum kuyu lazerine uygulanan gümüş kontaklar Şekil 3.1'de görüldüğü gibi GaAs tabakasına yapılmıştır. Bu durumda lazerin eşik gerilim değeri 0.85 V olarak elde edilmiştir. Essex Üniversitesi'nde yapılan ölçümlerde ise GaAs tabakasına altın kontak uygulanan örneğin eşik gerilim değeri 1.63 V olarak elde edilmiştir (Şekil 4.3). Eşik gerilimleri arasındaki 0.78 V farkın metal ve yarıiletken arasında oluşan kontak potansiyelinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.3. Kuantum kuyu lazerinin oda sıcaklığındaki I-V karakteristiği (Balkan 2003)



Şekil 4.4. Metal ile p-tipi yarıiletken arasında oluşan kontak potansiyeli

Metal-yarıiletken kontak yapıldığında Şekil 4.4'de gösterildiği gibi ara yüzeyde metal ve yarıiletken malzemeye göre değişen potansiyel engeli oluşur. ϕ_s ve ϕ_m sırasıyla yarıiletkenin ve metalin iş fonksiyonlarıdır. Materyallerin iş fonksiyonları farkından dolayı, kontak sonrası maddenin nötr olabilmesi için Fermi seviyeleri eşitleninceye kadar elektron geçişi olur. Yarıiletkenin iş fonksiyonunun metalin iş fonksiyonundan büyük olması durumunda metalden yarıiletkene elektronlar geçer. p tipi bölge negatif yüklendiği için Poisson denklemlerine göre ikinci türevi negatif (aşağı doğru eğri) bir band kıyısı oluşturur. p tipi GaAs tabakasına altın kontak yapıldığında ara yüzeyde oluşan potansiyel engeli, gümüş kontak uygulandığında oluşan potansiyel engelinden daha büyüktür (Mead ve Spitzer 1964). Engelin büyük olması, taşıyıcıların kuantum kuyusunda daha zor birikmelerini ve böylece yüksek akım oluşturmaları için daha yüksek gerilimin uygulanmasını gerektirir. Bu nedenle altın kontak uygulanarak yapılan ölçümlerdeki eşik gerilim değeri, gümüş kontak uygulanarak elde edilen eşik gerilim değerinden daha büyük bulunmuştur.

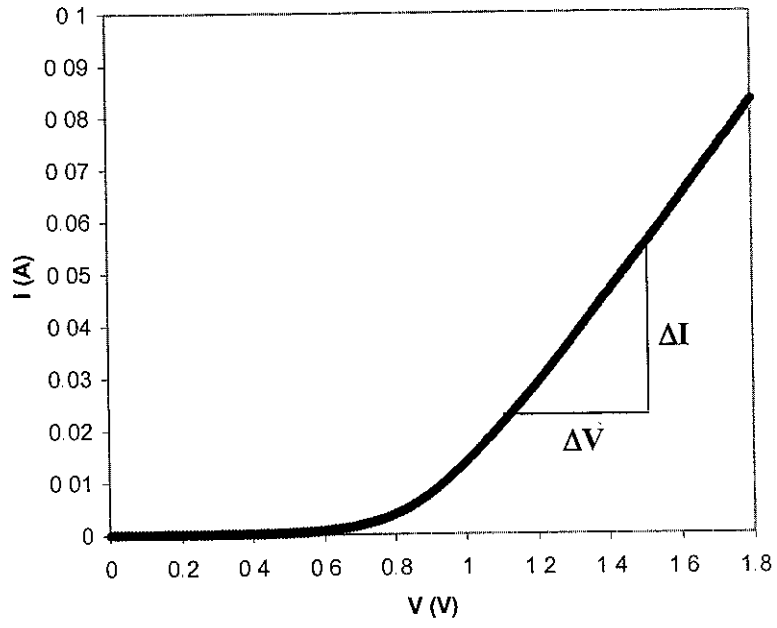
Lazer diyotlarda önemli bir parametre olan seri direnç, voltaj değişikliğinin akım değişikliğine oranıdır. Kuantum kuyu lazerinin I-V karakteristiğinin belirlenmesinde örneğe 0-1.8 V arasında 0.01 V adımlarla 10 Hz frekansında 1 ms'lik darbelerin uygulanmasıyla elde edilen Şekil 4.5'de gösterilmiş veriden yararlanılmıştır. Şekil 4.5'deki grafikten kuantum kuyu lazeri için seri direnç,

$$R_s = \frac{\Delta V}{\Delta I} = 11.65 \Omega \quad (4.1)$$

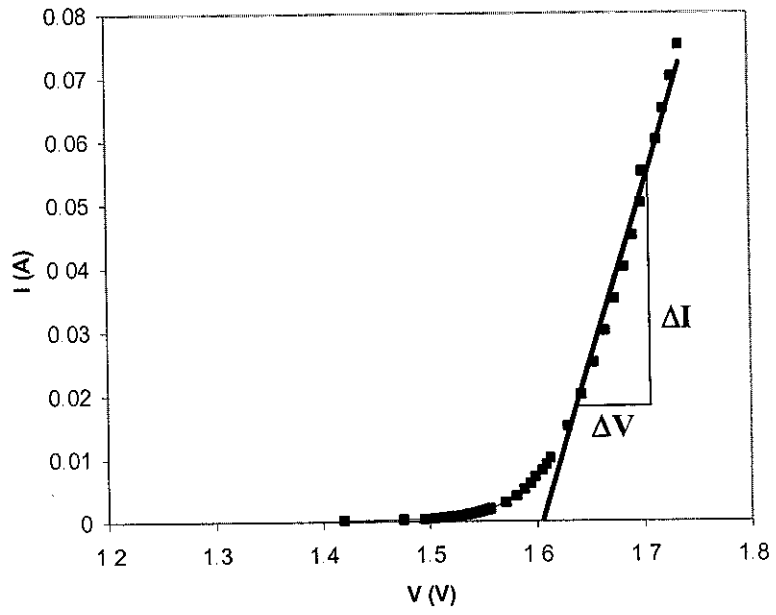
olarak elde edilmiştir. Essex Üniversitesi'nde elde edilen verilere göre bulunan seri direnç ise Şekil 4.6'deki grafikten,

$$R_s = \frac{\Delta V}{\Delta I} = 1.97 \Omega \quad (4.2)$$

değerinde bulunmuştur.



Şekil 4.5. Kuantum kuyu lazerinin oda sıcaklığındaki I-V karakteristiği

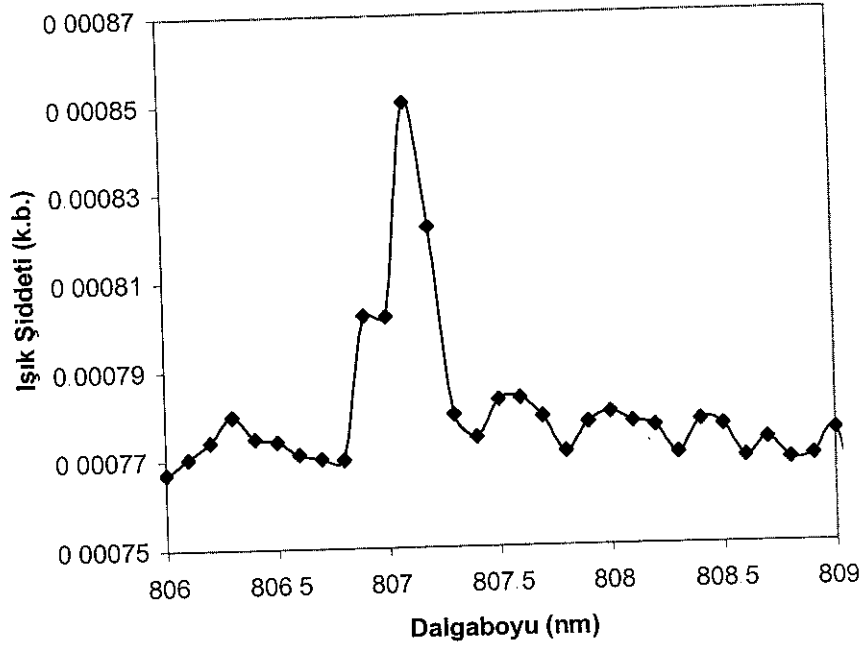


Şekil 4.6. Kuantum kuyu lazerinin oda sıcaklığındaki I-V karakteristiği (Balkan 2003)

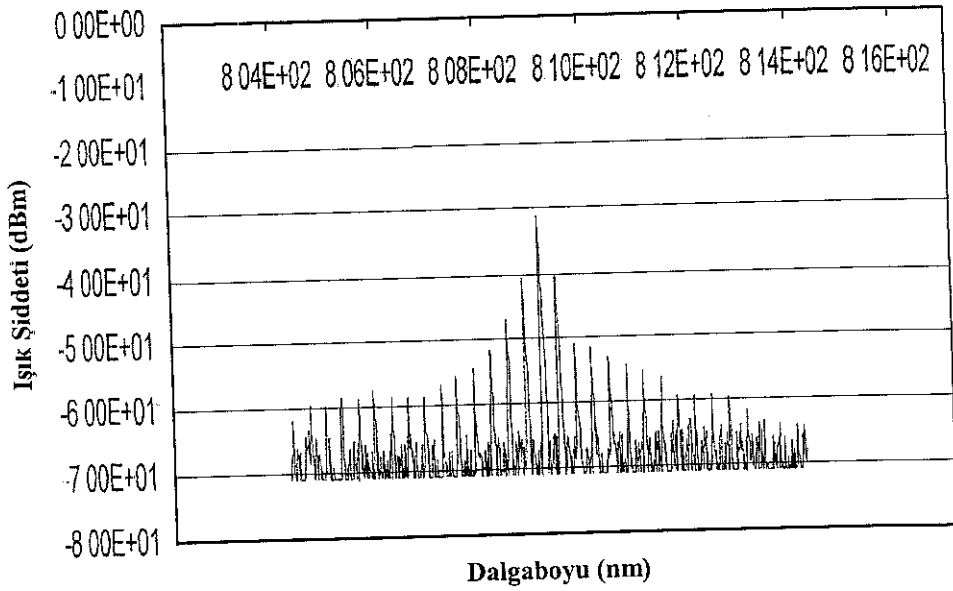
Yüksek seri direnç ısınmaya ve lazer frekansında değişime sebep olmaktadır. Bu nedenle I-V ölçümlerinde lazerin ısınmasını önlemek amacıyla, gerilimin örneğe darbeler şeklinde uygulanmasını sağlayacak bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Oluşturulan programda örneğe 'uygulama süresi' verisi süresince gerilim uygulanır. Gerilim uygulandığı anda örnek üzerinden geçen akım okunur ve kaydedilir. Veri elde edildikten sonra 'bekleme süresi' verisi süresince gerilim uygulanmaz ve örneğin soğuması sağlanır.

4.2. EL Ölçümleri

EL, dış voltaj uygulanması ile aktif bölge içerisinde elektron-delik çiftlerinin kendiliğinden uyarımı sonucu oluşturduğu ışımının diğer elektron-delik çiftlerini uyararak eş fazlı ışımaya oluşturmasıdır. Yeniden birleşmelerin sağlanabilmesi için kuantum kuyu lazerinin eşik akımından büyük bir değerde uyarılması gerekir. Eşik gerilimden yüksek gerilim değerinde (2 V) uyarılan kuantum kuyu lazerinin EL eğrisi Şekil 4.7'de gösterilmektedir. Kuantum kuyu lazerinin en şiddetli piki 807 nm dalgaboyunda gözlenmiş olup, banddan banda ilk durum elektronun (e1) ilk ağır delik (hh1) geçişine karşılık gelmektedir. Bu pikin yarı maksimum yükseklikte tam genişliği (FWHM) 0.2 nm'dir. 807 nm dalgaboyundaki bu ışımının $In_{0.09}Al_{0.17}Ga_{0.85}As$ yapısının Bölüm 3.1.2'de 1.536 eV olarak hesaplanan enerji aralığı değeriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Essex Üniversitesi'nde yapılan EL ölçümü, örneğe 6.5 V değerinde gerilim uygulanmasıyla elde edilmiş olup Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Kuantum kuyu lazerinin e1-hh1 geçişine karşılık gelen ışımaya 809 nm dalgaboyunda meydana gelmiştir. Örneğe yüksek gerilim uygulanması, yüksek elektrik alan oluşturulmasını ve dolayısıyla diğer frekanslarda harmonik piklerin elde edilmesini sağlamıştır. Farklı x ve y değerlerine sahip $In_xAl_yGa_{1-x-y}As$ yapısındaki kuantum kuyu lazerlerinin 731 nm, 800-880 nm, 915 nm dalgaboyunda ışımaya yaptığı belirlenmiştir (Moore vd 1992, Emanuel vd 1997, Xu vd 2003).



Şekil 4.7. Kuantum kuyu lazerinin oda sıcaklığındaki EL eğrisi

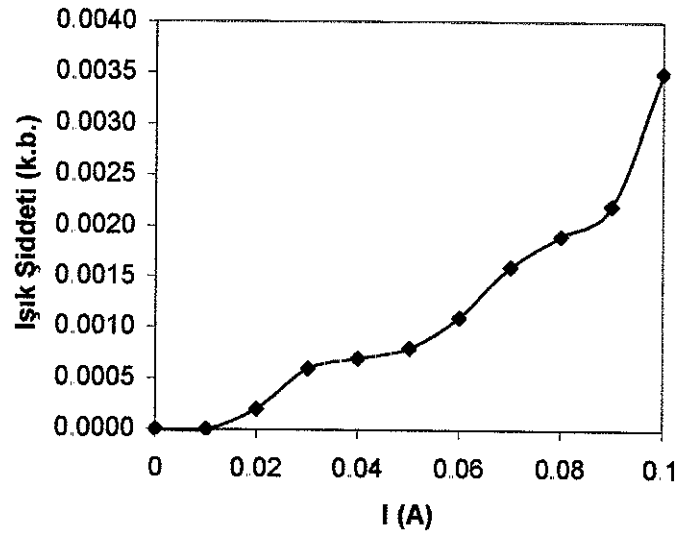


Şekil 4.8. Kuantum kuyu lazerinin oda sıcaklığındaki EL eğrisi (Balkan 2003)

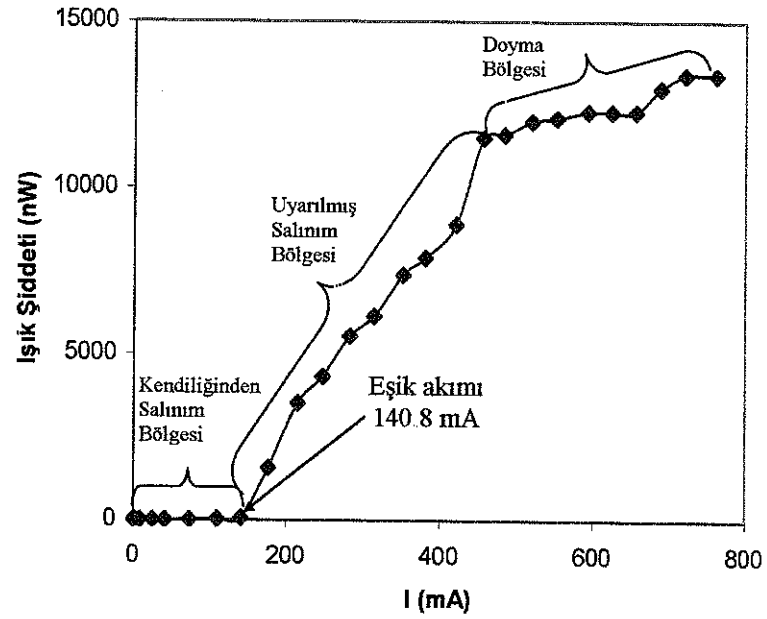
4.3. L-I Ölçümleri

Yarıiletken lazerlere uygulanan küçük akım değerleri için sadece kendiliğinden salınım oluşurken; akım arttıkça, ortamdaki taşıyıcıların yeniden birleşmesi artacağından uyarılmış salınım ve dolayısıyla lazer ışınması meydana gelir. Uyarılmış salınım olayının başladığı akım eşik akımı olup bu akım değerinden büyük akım değerlerinde lazerin optik gücünde (ışık şiddeti) ani bir artış meydana gelir. Çok yüksek akımlarda ise lazer doyuma ulaşarak sabit ışık şiddetine ulaşır. Optik güç ile akım arasındaki ilişki kullanılarak lazerin eşik akımı ve türevsel kuantum verimi gibi özellikleri belirlenebilir.

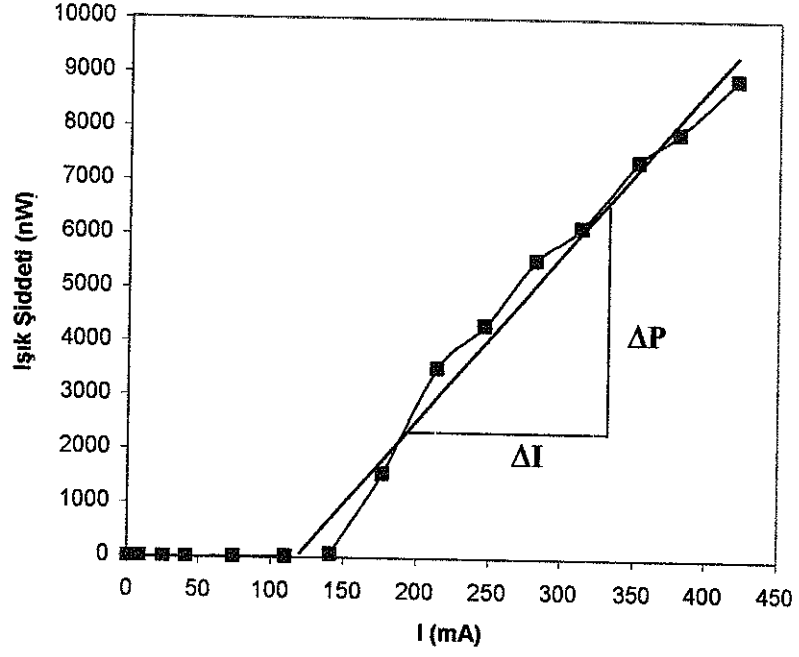
Kuantum kuyu lazerinin oda sıcaklığında eşik akım değerinden önceki L-I karakteristiği Şekil 4.9'da gösterilmektedir. Kuantum kuyu lazerine akım-gerilim kaynağından 100 mA değerine kadar akım uygulanabildiği için L-I karakteristiğinin sadece eşik akım değerinden önceki bölümü elde edilebilmiştir. Essex Üniversitesi'nde alınan ölçümler sonucunda kuantum kuyu lazerinin oda sıcaklığındaki L-I karakteristiği Şekil 4.10'da gösterildiği gibi sağlanmış ve eşik akım değeri 140.8 mA olarak bulunmuştur. Eşik akımı değerinden sonra lazer olayı başladığı için ışık şiddeti önemli ölçüde artmaktadır. 466 mA akım değerinden sonra ise kuantum kuyu lazeri doyuma ulaşmaktadır. Şekil 4.11'de kuantum kuyu lazerinin oda sıcaklığında doyuma ulaşmadan önceki L-I karakteristiği gösterilmektedir. Lazere uygulanan düşük akım değerlerinde sadece kendiliğinden salınım olduğu için ışık şiddetinde çok düşük değişimler gözlenmektedir. Kuantum kuyu lazerinin eşik akım değerinden önceki ışınma şiddetindeki bu küçük değişimler Şekil 4.12'de ayrıntılı olarak gösterilmektedir.



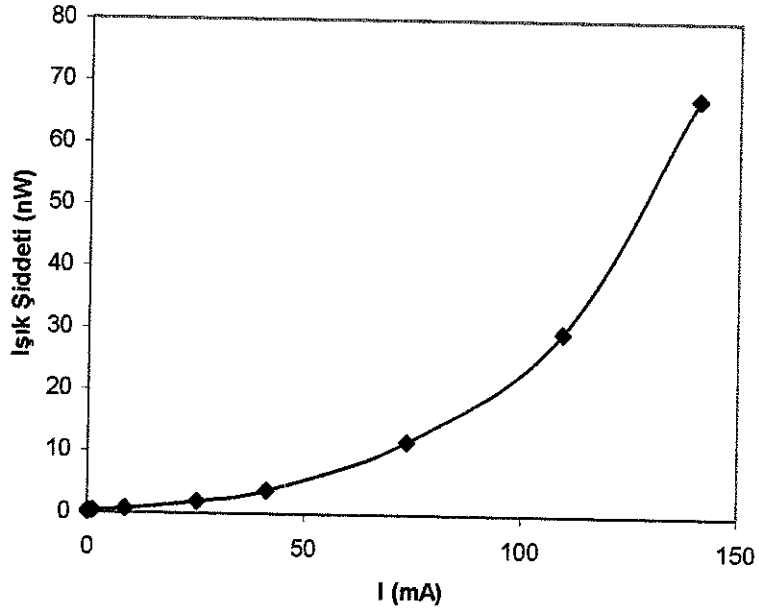
Şekil 4 9. Kuantum kuyu lazerinin oda sıcaklığında eşik akım değerinden önceki L-I karakteristiği



Şekil 4 10. Kuantum kuyu lazerinin oda sıcaklığındaki L-I karakteristiği (Balkan 2003)



Şekil 4.11. Kuantum kuyu lazerinin oda sıcaklığında doyuma ulaşmadan önceki L-I karakteristiği (Balkan 2003)



Şekil 4.12. Kuantum kuyu lazerinin oda sıcaklığında eşik akım değerinden önceki L-I karakteristiği (Balkan 2003)

Lazerden çıkan fotonların (optik güç) ışımayı oluşturan elektronlara (akım) oranı olarak tanımlanan türevsel kuantum verimi Eşitlik 2.43'e göre,

$$n_d = \frac{e \Delta P}{h \nu \Delta I} \quad (4.3)$$

olarak verilmektedir. Burada optik gücün değişiminin akım değişimine oranı birim yükle (e) çarpılıp foton enerjisine ($h\nu$) bölünmektedir. Eşitlik 4.3'de, Şekil 4.10'da belirlenen ΔP ve ΔI verileri kullanılarak, $\text{In}_{0.09}\text{Al}_{0.17}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ kuantum kuyu lazerinin türevsel kuantum verimi %22 olarak bulunmuştur. Bu denklemde kendiliğinden salınımın çok küçük olan etkisi hesaba katılmamaktadır. Bulunan türevsel kuantum verimi değeri $\text{InAlGaAs}/\text{GaAs}$ yapısındaki kuantum kuyu lazerlerinin %41-%93 arasında hesaplanan türevsel kuantum verimi değerlerine göre oldukça düşüktür (Moore vd 1992, Emanuel vd 1997, Xu vd 2003).

5. SONUÇ

Çalışmada $\text{In}_{0.09}\text{Al}_{0.17}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ tek kuantum kuyu lazerinin I-V, EL ve L-I özelliklerine bakılmıştır. I-V ölçümleri sonucunda kuantum kuyu lazerinin eşik gerilimi ve seri direnci belirlenmiştir. EL ve L-I ölçümleriyle kuantum kuyu lazerinin ışınım özellikleri incelenmiştir. Kuantum kuyu lazerini oluşturan yapıların band aralıklarının teorik hesaplanmasıyla enerji diyagramı oluşturulmuş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca L-I ölçümleriyle lazerin türevsel kuantum verimi hesaplanmıştır.

Lazer diyotların I-V karakteristiği, aygıtın kalitesinin belirlenmesi açısından önemlidir. İyi üretilmiş aygıtların I-V karakteristiklerinin tipik diyotunki gibi eşik gerilim değerinden sonra ani artış gösteren akım eğrisi şeklinde olması beklenir. $\text{In}_{0.09}\text{Al}_{0.17}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ kuantum kuyu lazerinin I-V ölçümleri alınarak diyot özelliği gösterdiği belirlenmiş ve lazerin eşik gerilim değeri 0.85 V olarak elde edilmiştir. Eşik gerilim değerinde örnek üzerinden geçen akım 5.64 mA'dır. Essex Üniversitesi'nde belirlenen eşik gerilim değeri ise 1.63 V olup örnek üzerinden 15 mA akım geçmektedir. Eşik gerilim değerleri arasındaki 0.78 V farkın metal yarıiletken kontak potansiyelinden kaynaklandığı düşünülmektedir. p tipi GaAs tabakasına altın kontak yapıldığında ara yüzeyde oluşan potansiyel engeli, gümüş kontak uygulandığında oluşan potansiyel engelinden daha büyük olduğundan taşıyıcıların kuantum kuyusunda birikmeleri zorlaşır. Bu nedenle altın kontak uygulanarak yapılan ölçümlerdeki eşik gerilim değeri, gümüş kontak uygulanarak elde edilen eşik gerilim değerinden daha büyük bulunmuştur. Ayrıca kuantum kuyu lazerinin seri direnci 11.65 Ω olarak elde edilmiştir. Bu değer Essex Üniversitesi'nde yapılan ölçümlerde 1.97 Ω olarak belirlenen değerden daha büyüktür. Yüksek seri direnç ısınmaya sebep olduğundan örneğin Joule ısısına maruz kalmaması için, I-V ölçümlerinde gerilim örneğe darbeler şeklinde uygulanmıştır.

EL ölçümleri sonucunda kuantum kuyu lazerinin 1.536 eV olarak hesaplanan enerji aralığı değeriyle uyumlu olan ve banddan banda e1-hh1 geçiş enerjisine karşılık gelen 807 nm dalgaboyunda ışınım yaptığı belirlenmiştir. Bu dalgaboyu Essex

Üniversitesi'nde 809 nm olarak belirlenen ışıma sonuçlarıyla uyuşmaktadır. Örneğe uygulanan gümüş kontak ve altın kontak farkı ışımının oluştuğu dalgaboyunda değişikliğe neden olmamıştır. Lazerin 807 nm dalgaboyundaki ışıma değeri, $In_xAl_yGa_{1-x-y}As/GaAs$ yapısındaki diğer kuantum kuyu lazerlerinin 731 nm, 800-880 nm, 915 nm dalgaboyundaki ışıma verileriyle uyuşmaktadır.

Kuantum kuyu lazerinin L-I karakteristikleri incelenmiş ve eşik akım değeri 140.8 mA olarak bulunmuştur. Örneğe bu eşik akım değeri üzerinde akım uygulandığında lazer ışıma yapmaktadır. Lazerin çıkış gücü birkaç mikrowatt mertebesinde olduğundan düşüktür. Lazerin türevsel kuantum verimi %22 olarak bulunmuştur. Bu değer $In_xAl_yGa_{1-x-y}As /GaAs$ yapıdaki kuantum kuyu lazerlerinin %41-%93 arasında değişen türevsel kuantum verimi değerlerine göre oldukça düşüktür.

Bu çalışma kapsamında ayrıca kurulmakta olan katihal laboratuvarında lazer diyotların I-V, EL ve L-I özelliklerinin incelenmesi için deney düzeneklerinin oluşturulması ve verilerin bilgisayar kontrollü elde edilmesi için gerekli programların yazılması ve etkinleştirilmesi sağlanmıştır. Sonuçların test edilmesi örneğin sağlandığı Essex Üniversitesi'nden alınan verilerle karşılaştırma yapılmış ve sonuçların uyumlu olduğu gözlenmiştir. Ayrıca hazırlanan programlar etkin şekilde çalışmaktadır.

Son iki yılda yapılan çalışmalar InN yapısının yasak enerji aralığının fiber optik kayıplarının en az olduğu dalgaboyu aralığı ile uyumlu olan 0.65-0.90 eV arasında olduğunun bulunmasından dolayı, ileriki çalışmalarda özellikle InN yapısındaki lazer diyotların aygıt karakteristiği için I-V, EL ve L-I ölçümlerinin yapılması hedeflenmektedir.

6. KAYNAKLAR

- ARAKAWA, Y and SAKAKI, H. 1982. Multidimensional quantum well laser and temperature dependence of its threshold current *Appl Phys. Lett.*, 40: 939-941.
- ASADA, M., MIYAMOTO, Y. and SUEMATSU, Y. 1986. Gain and the threshold of three dimensional quantum box lasers. *J. Quantum Electron.*, 22: 1915-1921.
- BALKAN, N. 2003. University of Essex, Department of Electronic Systems Engineering, Optoelectronic Materials and Devices Laboratory, UK.
- BARWOLFF, A., TOMM, J. W., MULLER, R., WEISS, S., HUTTER, M., OPPERMANN, H. and REICHL, H. 2000. Spectroscopic measurement of mounting-induced strain in optoelectronic devices *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 23: 170-175.
- BASOV, N. G., BOGDANKEVICH, O. V. and GRASYUK, A. Z. 1966. Semiconductor lasers with radiating mirrors *IEEE J. Quantum Electron.*, 2: 594-597.
- BELLOTTI, E., DOSHI, B. K., BRENNAN, K. F., ALBRECHT, J. D. and RUDEN, P. P. 1999. Ensemble Monte Carlo study of electron transport in wurtzite InN. *J. Appl. Phys.*, 85: 916-923.
- BOGDANKEVICH, O. V., DARZNEK, S. A., PECHENOV, A. N., VASILIEV, B. I. and ZVEREV, M. M. 1973. Semiconductor electron-beam-pumped lasers of the radiating mirror type *IEEE J. Quantum Electron.*, 9: 342-347.
- BURNHAM, R. D., HOLONYAK, N. and SCIFRES, D. R. 1970. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{P}_y$ -GaAs $_{1-y}\text{P}_y$ heterostructure laser and lamp junctions. *Appl. Phys. Lett.*, 17: 455-457.
- CHINN, S. R., ZORY, P. S. and REISINGER, A. R. 1988. A model for GRINSCH-SQW diode lasers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 24: 2191-2213.
- CHO, A. Y., DIXON, R. W., CASEY, H. C. and HARTMAN, R. L. 1976. Continuous room temperature operation of AlGaAs-GaAs double heterostructure lasers prepared by Molecular Beam Epitaxy *Appl. Phys. Lett.*, 28: 501-503.
- CHUANG, S. R. 1991. Effective band-structure calculations of strained quantum wells. *Phys. Rev. B.*, 43: 9649-9661.
- COLDREN, L. A. and CORZINE, S. W. 1995. Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits. John Wiley and Sons, Inc., USA, 594 pp.
- DAVYDOV, V. Y., KLOCHIKHIN, A. A., SEISYAN, R. P., EMISEV, V. V., IVANOV, S. V., BECHSTEDT, F., FURTHMULLER, J., HARIMA, H., MUDRYI, A. V., ADERHOLD, J., SEMCHINOVA, O. and GRAUL, J. 2002. Absorption and Emission of Hexagonal InN: Evidence of Narrow Fundamental Band Gap. *Phys. Stat. Sol. B.*, 229: R1.
- DUPUIS, R. D. and DAPKUS, P. D. 1978. Room temperature operation of $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ /GaAs double heterostructure lasers grown by metal organic chemical vapour deposition. *Appl. Phys. Lett.*, 31: 466-468.
- DUPUIS, R. D., DAPKUS, P. D., CHIN, R., HOLONYAK, N. and KIRCHHOEFER, S. W. 1979-a. Continuous 300 K operation of single quantum well AlGaAs-GaAs heterostructure diodes grown by metal organic chemical vapour deposition. *Appl. Phys. Lett.*, 34: 265-267.
- DUPUIS, R. D., HOLONYAK, N. and KOLBAS, R. M. 1979-b. Continuous room temperature multiple quantum well AlGaAs-GaAs injection lasers grown by metal organic chemical vapour deposition. *Appl. Phys. Lett.*, 35: 487-489.

- EMANUEL, M A , SKIDMORE, J A , JANSEN, M and NABIEV, R. 1997 High-power InAlGaAs-GaAs laser diode emitting near 731 nm. *IEEE Photonics Technology Letters*, 9: 1451-1453
- FIEDLER, F. and SCHLACHETZKI, A. 1987. Optical Parameters of InP-based Waveguides. *Solid-State Electron.*, 30: 73-83
- FOUTZ, B E , O'LEARY, S. K., SHUR, M. S. and EASTMAN, L. F. 1999. Transient electron transport in wurtzite GaN, InN, and AlN. *J. Appl. Phys.*, 85: 7727 - 7734.
- HALL, R N , FENNER, G E , KINGSLEY, J D , SOLTYS, I. J. and CARLSON, R. O. 1962. Coherent light emission from GaAs junctions. *Phys. Rev. Lett.*, 9: 366-368
- HAYASHI, I., PANISH, M B., FOY, P W. and SUMUSKI, S. 1970 Junction lasers which operate continuously at room temperature. *Appl. Phys. Lett.*, 17: 109-111.
- HEPBURN, C. J. 2001. Temperature Dependent Operation of Vertical Cavity Surface Emitting Lasers (VCSELs) Master of Science Thesis, University of Essex, 194 pp.
- HIRAYAMA, Y., CHOI, W. Y., PENG, L. H. and FONSTAD, C. G. 1993. Absorption spectroscopy on room temperature excitonic transitions in strained layer InGaAs/InGaAlAs multi-quantum-well structures. *J. Appl. Phys.*, 74: 570-578.
- HOLONYAK, N and BEVACQUA, S. F. 1962. Coherent (visible) light emission from Ga(As_{1-x}P_x) junctions. *Appl. Phys. Lett.*, 1: 82-83.
- HOLONYAK, N, KOLBAS, R. M., LAIDIG, W. D., VOJAK, R., DUPUIS, D and DAPKUS, P. D. 1978. Room-temperature continuous operation of photopumped MOCVD Al_xGa_{1-x}As-GaAs- Al_xGa_{1-x}As quantum well lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 33: 73-75.
- HOOK, J. R. and HALL, H E. 1999. Katihal Fiziği. Literatür Yayınları, ss 170-184, İstanbul
- HORI, M., KANO, K., YAMAGUCHI, T., SAITO, Y., ARAKI, T., NANISHI, Y., TERAGUCHI, N. and SUZUKI, A. 2002. Optical Properties of In_xGa_{1-x}N with Entire Alloy Composition on InN Buffer Layer Grown by RF-MBE. *Phys. Stat. Sol. B.*, 234: 750-754.
- JENSEN, J. R., HVAM, J. M. and LANGBEIN, W. 1999. Optical properties of InAlGaAs quantum wells: Influence of segregation and band bowing. *J. Appl. Phys.*, 86: 2584-2589
- JOYCE, W B and DIXON, R W. 1977. Analytic approximations for the Fermi energy of an ideal Fermi gas. *Appl. Phys. Lett.*, 31: 354-356
- KOGELNIK, H. and SHANK, C V. 1972. Coupled-wave theory of distributed feedback lasers. *J. Appl. Phys.*, 43: 2327- 2335.
- KONDOW, M., UOMI, K., NIWA, A., KITATANI, T., WATAHIKI, S. and YAZAWA, Y. 1996. GaInNAs: a novel material for long-wavelength-range laser diodes with excellent high-temperature performance. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 35: 1273-1275.
- KONDOW, M., NAKATSUKA, S., KITATANI, I., YAZAWA, Y. and OKAI, M. 1997. GaInNAs laser diode for high temperature operation. *Proceedings of 2nd Optoelectronics and Communication Conf.*, Seoul, Korea, paper 9C2-1.
- KROEMER, H. 1963. A proposed class of heterojunction injection lasers. *Proc IEEE*, 1: 1782-1783.

- LARSON, M. C., KONDOW, M., KITATANI, T., YAZAWA, Y. and OKAI, M. 1997. Room temperature continuous-wave photopumped operation of 1.22 μm GaInNAs/GaAs single quantum well vertical surface emitting laser. *Electron. Lett.*, 33: 959-960.
- LI, E. H. 2000. Material parameters of InGaAsP and InAlGaAs systems for use in quantum well structures at low and room temperatures. *Physica E*, 5: 215-273.
- MAIMAN, I. H. 1960. Optical and Microwave Optical Experiments in Ruby. *Phys. Rev. Lett.*, 4: 564-566
- MATSUOKA, T., OKAMOTO, H., NAKAO, M., HARIMA, H. and KURIMOTO, E. 2002. Optical bandgap energy of wurtzite InN. *Appl. Phys. Lett.*, 81: 1246-1248.
- MEAD, C. A. and SPITZER, W. G. 1964. Fermi level position at metal-semiconductor interfaces. *Phys. Rev.*, 134: 713-716
- MELNGAILIS, I. 1965. Longitudinal injection-plasma laser of InSb. *Appl. Phys. Lett.*, 6: 59-69.
- MOHAMMAD, S. N., and MORKOC, H. 1996. Progress and Prospects of Group-III Nitride Semiconductors. *Prog. Quant. Electron.*, 20: 361-525
- MOORE, A. H., HOLEHOUSE, N., LEE, S. R. and MURISON, R. F. 1992. The performance and reliability of 800-880 nm InAlGaAs/AlGaAs and InGaAs/AlGaAs strained layer ridge waveguide lasers. *J. Cryst. Growth*, 124: 703-708.
- NATHAN, M. I., DUMKE, W. P., BURNS, G., DILL, F. H. and LASHER, G. 1962. Stimulated emission of radiation from GaAs p-n junction. *Appl. Phys. Lett.*, 1: 62-64.
- REZEK, E. A., HOLONYAK, N. and VOJAK, B. A. 1977-a. LPE $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}_{1-z}\text{As}_z$ ($x \sim 0.12$, $z \sim 0.26$) DH laser with multiple thin-layer ($< 500 \text{ \AA}$) active region. *Appl. Phys. Lett.*, 31: 288-290.
- REZEK, E. A., SHICHIJO, H., VOJAK, B. A. and HOLONYAK, N. 1977-b. Confined-carrier luminescence of a thin $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}_{1-z}\text{As}_z$ well ($x \sim 0.13$, $z \sim 0.29$; $\sim 400 \text{ \AA}$) in an InP p-n junction. *Appl. Phys. Lett.*, 31: 534-536.
- RUPPRECHT, H., WOODALL, J. M. and PETTIT, G. D. 1967. Efficient visible electroluminescence at 300 K from $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ p-n junctions grown by liquid-phase epitaxy. *Appl. Phys. Lett.*, 11: 81-83.
- SAGOL, B. E. 1998. Fabrication and Characterization of Semiconductor Double Quantum Well Diode Lasers. Master of Science Thesis, Bilkent University, 78 pp.
- SALEH, B. E. A. and TEICH, M. C. 1991. Fundamentals of Photonics. J. W. Goodman (Editor), John Wiley & Sons, Inc., pp. 568-577, New York.
- SATO, S., OSAWA, Y., SAITOH, T. and FUJIMURA, I. 1997. Room temperature pulsed operation of 1.3 μm GaInNAs/GaAs laser diode. *Proceedings of CLEO Pacific Rim '97*, Chiba, paper PD2-6.
- SELMIC, S. R., CHOU, T., SIH, J., KIRK, J. B., MANTIE, A., BUTLER, J. K., BOUR, D. and EVANS, G. A. 2001. Design and Characterization of 1.3 μm AlGaInAs-InP Multiple-Quantum-Well Lasers. *IEEE Journal on selected Topics in Quantum Electronics*, 7: 340-349.
- SHAWLOW, A. L. and TOWNES, C. H. 1958. Infrared and Optical Masers. *Phys. Rev.* 112: 1940-1949.
- SINGH, J. 1995. Semiconductor Optoelectronics. S. W. Director (Editor), McGraw-Hill, Inc., pp. 21-490, New York.

- TANSLEY, T. L. and FOLEY, C. P. 1986 Optical band gap of indium nitride. *J Appl Phys.*, 59: 3241-3244.
- TEKE, A. 1997 Hot Electron Light Emission in GaAs/Al_xGa_{1-x}As Heterostructures. Ph.D Thesis, University of Essex, 218 pp.
- TOMM, J. W., BARWOLFF, A., ELSAESSER, T. and LUFT, J. 2000 Selective excitation and photoinduced bleaching of defects in InAlGaAs/GaAs high-power diode lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 77: 747-749.
- TSANG, W. T. 1982 Extremely low threshold AlGaAs graded index waveguide separate confinement heterostructure lasers grown by molecular beam epitaxy. *Appl. Phys. Lett.*, 40: 217-219.
- UJI, I., IWAMOTO, K. and LANG, R. 1981. Nonradiative recombination in InGaAsP/InP light sources causing light emitting diode output saturation and strong laser-threshold-current temperature sensitivity. *Appl. Phys. Lett.*, 38: 193-195.
- VAN DER ZIEL, J. P., DINGLE, R., MILLER, R. C., WIEGMANN, W. and NORDLAND, W. A. 1975 Laser oscillation from quantized states in very thin AlGaAs-GaAs multilayer structure. *Appl. Phys. Lett.*, 26: 463-465.
- WU, J., WALUKIEWICZ, W., YU, K. M., ARGER, J. W., HALLER, E. E., LU, H., SCHAFF, W. J., SAITO, Y. and NANISI, Y. 2002 Unusual properties of the fundamental band gap of InN. *Appl. Phys. Lett.*, 80: 3967-3969.
- XU, Z., GAO, W., NELSON, A., LUO, K., YANG, H., CHENG, L., SISKAVICH, B., WANG, Z. and CHIN, A. K. 2003. High-power single-mode 915-nm InAlGaAs quantum-well lasers grown by MOCVD. *Proceedings of Novel In-Plane Semiconductor Lasers V Conference- 4995, USA*

I-V Ölçümleri İçin Yazılan Program

```

1) Clear GPIB1
2) Clear graph I-V Karakteristiği
3) Set V to
4) Set I to
5) Clear Container V
6) Clear Container I
7) Output to GPIB1 with "B" , "Ön Besleme Gerilimi [V]" , "Gerilim Limiti" , "0X" , term.=LF send EOI?=1
8) Output to GPIB1 with "F0.1X" , "1.100E-3.9X" , "NIX" , "H0X" , term.=LF send EOI?=1
9) Output to GPIB1 with "Q4" , "Başlangıç Gerilimi [V]" , "Bitiş Gerilimi [V]" , "Adım [V]" , term.=LF send EOI?=1
10) Output to GPIB1 with Gerilim Limiti , "Uygulama Süresi [ms]" , "Bekleme Süresi [ms]" , "X" , term.=LF send EOI?=1
11) Output to GPIB1 with "B1.2.2X" , term.=LF send EOI?=1
12) Enter from GPIB1 up to 256 bytes, stop on EOS=LF or EDI
13) Store in Container V from GPIB1
14) Set V to Container V
15) Output to GPIB1 with "G4.2.2X" , term.=LF send EOI?=1
16) Enter from GPIB1 up to 256 bytes, stop on EOS=LF or EDI
17) Store in Container I from GPIB1
18) Set I to Container I
19) Draw graph I-V Karakteristiği with Container V , Container I
20) Output to Veriler with Container V , Container I , term.=CRLF
21) Output to GPIB1 with "N0X" , term.=LF send EOI?=1

```

EL Ölçümleri İçin Yazılan Program

1) Clear graph	Işma Karakteristiği	
2) Clear	Container1	
3) Clear	Container2	
4) Set	Işma Karakteristiği(From)	to Başlangıç Dalgaboyu (nm)
5) Set	Işma Karakteristiği(To)	to Bitiş Dalgaboyu (nm)
6) Linear series	Loop1	from Başlangıç Dalgaboyu (nm) to Bitiş Dalgaboyu (nm), step by Adım (nm)
7) Output to	GPIB1	with "IGW" , Loop1 , term.=CR send EOI?=1
8) Output to	GPIB2	with "DATA?" , term.=LF send EOI?=1
9) Enter from	GPIB2	up to 256 bytes, stop on EOS=LF or EOI
10) Delay	Time1	for Zaman (s) seconds
11) Append to	Container1	from Loop1
12) Append to	Container2	from GPIB2
13) Set	Wavelength (nm)	to Loop1
14) Set	V (V)	to GPIB2
15) Add point(s) to	Işma Karakteristiği	from Loop1 , GPIB2 , max # points=10000
16) End	Loop1	
17) Output to	Veriler	with Container1 , Container2 , term.=CR LF