

# UZUN DALGABOYLU VE KONİK YAPILI YARIİLETKEN LAZERLERİN ÜRETİMİ, DENEYSEL VE TEORİK OLARAK İNCELENMESİ

Bülent ÇAKMAK<sup>1,2</sup>, Çağlar DUMAN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Böl. 25240 Erzurum,

<sup>2</sup>Erzurum Teknik Üniversitesi, Çat yolu 4. km Erzurum

<sup>3</sup>Atatürk Üniversitesi, Erzurum Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Böl. 25240 Erzurum

[bcakmak@atauni.edu.tr](mailto:bcakmak@atauni.edu.tr)

(Geliş/Received: 11.10.2011; Kabul/Accepted: 06.06.2012)

## ÖZET

Bu çalışmada, 1300 nm ve 1550 nm’de çalışan yarıiletken lazerlerin fabrikasyonu ile ışık çıkışı-akım (P-I) ve boylamsal mod spektrumunu içeren karakterizasyon ölçüm sonuçları sunulmaktadır. Ayrıca lazer oran denklemleri kullanılarak lazerin P-I karakteristiğinin ve boylamsal mod spektrumunun modelleme sonuçları da elde edilmiştir. Elde edilen modelleme sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Her iki lazer türü için gerçekleştirilen çalışmalarda eşik akımı 30 mA ölçülürken, bu değer modellemede 27 mA olarak elde edilmiştir. Ayrıca lazer kavite uzunluğunun artışı ile kayıpların artışından dolayı eşik akımının da arttığı gözlemlenmiştir. Buna ilave olarak ölçülen optik spektrumun merkezi dalgaboyları tasarım değerlerine yakın elde edilmiştir. Son olarak, 1300 ve 1550 nm lazerlerin 3-dB spektral genişlikleri deneysel olarak ve modelleme ile bulunmuştur. 3-dB spektral genişlik bakımından ölçüm ile simülasyon arasındaki fark 1550 nm lazerlerde 1.6 nm iken, bu değer 1300 nm lazerlerde 10 nm olarak elde edilmiştir. 1550 nm lazerler için elde edilen bu fark diğerine göre çok daha düşük olduğundan 1550 nm lazerlerin 1300 nm lazerlere göre daha kararlı bir spektral değişime sahip oldukları sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Yarıiletken Lazerler, Fabrikasyon, Karakterizasyon Ölçümleri, Oran Denklemleri.

## EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATION OF FABRICATED LONG WAVELENGTH TAPERED SEMICONDUCTOR LASERS

### ABSTRACT

In this study, fabrication and light output-current and longitudinal optical spectral characteristics of semiconductor lasers operating in the wavelengths of 1300 nm and 1550 nm are investigated. In addition, modelling of P-I and longitudinal optical spectrum characteristics of the lasers is obtained using rate equations. We observed that experimental results are well agreed with simulation. Threshold current is measured to be 30 mA while it is 27 mA in simulation for the lasers with 1300 nm and 1550 nm wavelengths. It is also found that the threshold current increases with increasing cavity length due to an increase in the losses. Furthermore, central wavelength of the optical spectra is obtained to be close to the design parameters. Finally, 3-dB spectral width is obtained experimentally and theoretically. 3-dB spectral width difference between experiment and simulation in 1550 nm lasers is obtained to be 1.6 nm while it is 10 nm in 1300 nm lasers. Because this difference obtained for 1550 nm lasers is much lower than that of 1330 nm lasers, it can be concluded that 1550 nm lasers have got better spectral stability than that of 1300 nm lasers.

**Key Words:** Semiconductor lasers, fabrication, characterisation measurements, rate equations.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yarıiletken lazerler (diyot lazerler), kompakt ve çok küçük boyutlu olması (birkaç yüz mikron), doğrudan modüle edilebilmesi, ucuz olması, elektriksel olarak

sürülebilmesi, uzun ömrü, yüksek güvenilirliği ve yüksek verimliliğe sahip olması dolayısıyla günümüzde fiber optik haberleşme sistemlerinde, CD-DVD-Blue Ray okuyucu ve yazıcılarında, elektro-

optik ve fotonik anahtarlamada, endüstride, optik zaman-çoğullamalı sistemlerde, tümleşik optik sistemlerde, askeri ve medikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Çok farklı dalga boylarına (mor ötesinden uzak kızılötesine kadar) sahip olan yarıiletken lazerler günümüzde üretilmektedir. Yarıiletken lazerlerin en önemli uygulama alanlarından biri fiber optik haberleşmedir. Tek bir fiber kablo, bakır kablolarla karşılaştırıldığında 1000 kat daha fazla bilgi taşıyabilmekte ve bakır hat için 1,92 km olan tekrarlama (zayıflayan sinyali yükseltme) mesafesi fiber hat için 99 km olmaktadır [2]. Ayrıca geniş bant internet haberleşmesine de imkân tanıyan fiber optik haberleşme için yarıiletken lazerler verici tarafının vazgeçilmez optoelektronik aygıtları olmuştur.

Fiber optik haberleşmede 1300 nm ve 1550 nm dalgaboyları oldukça önem kazanmaktadır, çünkü bu dalgaboylarındaki kayıplar oldukça düşüktür (~0.2 dB/km). Bu nedenle bu dalgaboyunda çalışan yarıiletken lazerler özellikle fiber optik haberleşme sistemlerinde ışık kaynağı olarak kullanılmaktadırlar [3]. Fiber optik ağların daha kompleks ve sofistike hale gelmesiyle lazerlerin artan performans gereksinimleri ortaya çıkmıştır [4]. Bu amaçla yarıiletken lazerlerin çalışma karakteristiklerinin detaylı analizi yüksek hızlı optik linklerin tasarımında önemlidir. Ayrıca lazer simülasyonları ile lazer karakteristikleri daha detaylı incelenerek lazer diyot yapılarının optimizasyonu sağlanabilir. Literatürde optik haberleşme sistemlerinde kullanılan yarıiletken lazer diyotların teorik ve deneysel incelemelerini ele alan birçok çalışma vardır [5-14]. Fiber optik haberleşme sistemleri (örneğin FLAG olarak isimlendirilen kıtalararası optik iletişim ağı İngiltere'yi, Avrupayı, Kuzey Afrika'yı, Asya'yı ve Japonya'yı birbirine bağlamaktadır) son 20 yıldır okyanus ötesi kıtalar arasında kurulmakta ve geleceğin yüksek kapasiteli sistemleri (terabit mertebelerinde data haberleşmesi) olarak öngörülmektedirler. Bu çalışmada fiber optik haberleşme dalgaboylarında çalışan InGaAsP/InP (1300 nm) ve InGaAlAs/InP (1550 nm) diyot lazerlerin üretimi, karakterizasyon ölçümleri ve modellemesi gerçekleştirilmiştir. Lazerlerin üretimi Bilkent Üniversitesi 1000 sınıfı temiz odalarında ve karakterizasyon ölçümleri de Atatürk Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü Fotonik Karakterizasyon Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Bu tür lazerlerin üretim ve karakterizasyonu literatüre bakıldığında ülkemizde ilk kez gerçekleştirilmiştir.

## 2. LAZERLERİN ÜRETİMİ (FABRICATION OF LASERS)

Lazerlerin üretimi için InP tabanlı iki ayrı çoklu katmanlı epitaksiyel malzeme yapısı kullanılmıştır. Bu epitaksiyel yapılar üç adet kuantum çukurlu (QW) InGaAsP/InP (1300 nm) ve beş adet QW'li

AlGaInAs/InP (1550 nm) yapılarıdır. Her iki çoklu katmanlı malzeme yapısı moleküler ışın demeti epitaksi (MBE) metodu kullanılarak IQE (Europe) firması tarafından büyütülmüştür. Aktif katmanı üç adet QW'den oluşan InGaAsP/InP (1300 nm) malzeme yapısının InP tabandan (substrate) itibaren katman yapısı şu şekildedir: 1 µm kalınlığında n-tipi InP alt kılıf katmanı (lower cladding layer), katkısız 524 nm kalınlığında dalgaklavuzu katmanı (waveguide layer), 200 nm p-tipi InP geçiş katmanı, 8 nm p-tipi InGaAsP aşındırma durdurma katmanı (etch stop layer), 1.3 µm p-tipi InP üst kılıf katmanı (upper cladding layer) ve son olarak 200 nm p-tipi GaInAs kontak katmanı (contact layer). Dalgaklavuzu içinde yer alan aktif katman üç adet 8 nm kalınlığında InGaAsP kuantum çukur (QW) ile bunları çevreleyen üç adet 10 nm kalınlığında InGaAsP bariyerlerden oluşmaktadır. Ayrıca bu aktif katman 220 nm kalınlığında InGaAsP dörtlü bileşiğinden oluşan ayırık hapsedme heteroyapı (seperate confinement heterostructure) katmanı tarafından çevrelenmektedir.

Aktif katmanı beş adet QW'den oluşan AlGaInAs/InP (1550 nm) malzeme yapısının InP tabandan itibaren katman yapısı şu şekildedir: 0,8 µm kalınlığında n-tipi InP alt kılıf katmanı (lower cladding layer), katkısız 226 nm kalınlığında dalgaklavuzu (waveguide layer), 25 nm p-tipi InGaAsP aşındırma durdurma katmanı (etch stop layer), 1,6 µm p-tipi InP üst kılıf katmanı (upper cladding layer), 50 nm p-tipi InP geçiş katmanı ve son olarak 200 nm p-tipi GaInAs kontak katmanı (contact layer). Aktif katman, 10 nm kalınlığında AlGaInAs bariyerler arasına yerleştirilmiş 6 nm kalınlığında beş adet AlGaInAs kuantum çukurdan oluşmaktadır. Kuantum çukurlar, her iki yönde 60 nm kalınlığında AlGaInAs tampon katman ile çevrelenmiştir.

Fabrikasyon işleminde kullandığımız maskeler sırt dalgaklavuzu maskesi ve kontak pencere maskesi olmak üzere iki çeşittir. Tüm maskeler 2°'lik konik açı ve 4 µm'lik dalgaklavuzu genişliğine sahip olacak şekilde grubumuz tarafından tasarlanmış ve yurtdışında kuvarz malzeme üzerine serdirilmiştir. Fabrikasyonun birinci aşamasında, numunelerimiz metanol, aseton ve isopropanol alkol ile beşer dakika süre ile ultrasonik banyoda temizlendikten sonra PECVD (Plasma İyileştirmeli Kimyasal Buhar Depozisyonu) ile 200 nm kalınlığında SiO<sub>2</sub> ile kaplanmıştır. Akabinde sırt dalgaklavuzu maskesi kullanılarak standart fotolitografi işlemi uygulanmış ve numunelerimizin üzerine buharlaştırma ile 50 nm kalınlığında Ni kaplanmıştır. Taban üzerindeki SiO<sub>2</sub> katman CHF<sub>3</sub>/O<sub>2</sub> (40/3 sccm) gaz karışımı kullanılarak reaktif iyon dağlama (RIE) ile kaldırılmış ve böylece numunelerimiz üzerinde SiO<sub>2</sub>/Ni maske oluşturulmuştur. Yarıiletken taban üzerinde SiO<sub>2</sub>/Ni maske oluşturulmasının sebebi lazerlerimizi sırt

dalgaklavuzlu (ridge waveguide) olarak oluşturmak içindir 1,7 µm derinliğinde ve 4 µm genişliğinde sırt (bombe) dalgaklavuzu, InGaAs kontak ve InP üst kılıf katmanları RIE ile dağlanmak suretiyle elde edilmiştir. Bu RIE prosesi, H<sub>2</sub>:CH<sub>4</sub> (20:10 sccm) gaz karışımı kullanmak suretiyle 400 W RF güç ve 0.75 mTorr proses basıncı altında gerçekleştirilmiş ve 50 nm/dk'lık dağlama oranı (etch rate) elde edilmiştir. In<sub>0,85</sub>GaAs<sub>0,33</sub>P dörtlü bileşik katmanı (dağlama durdurma katmanı) dağlama derinliğinin hassas kontrolünü sağlamıştır.

RIE odasında (chamber) biriken polimer katmanı, herbir dağlama işleminden sonra oksijen plazma (rf güç=150 W ve akış oranı=50 sccm) ile temizlenmiştir. RIE prosesindeki dağlama işlemi, iyonlar tarafından yüzeyin aşındırılmasından dolayı fiziksel ve uçucu ürünlerin formasyonundan dolayı da kimyasal bir işlemdir. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve HF kullanarak iki katmanlı maskeyi (SiO<sub>2</sub>/Ni) kaldırdıktan sonra, PECVD ile 200 nm kalınlığında bir SiO<sub>2</sub> dielektrik katmanı kaplanmıştır. İkinci bir fotolitografi prosesi ile kontak pencere maskesi uygulandıktan sonra, akımın bombe klavuz içinde kalması için HF ile dalgaklavuzu üzerindeki SiO<sub>2</sub> katmanı kaldırılmıştır. Bu işlemin akabinde, 20 nm titanyum (Ti) ve 200 nm altından (Au) oluşan metal alaşım p- tarafına kaplanmıştır. Numulerimizi 150 µm'ye inelttikten sonra son olarak, 14 nm altın (Au), 14 nm germanyum (Ge), 14 nm Au, 11 nm Ni ve 200 nm Au alaşımı n- tarafına kaplanmıştır. Böylece fabrikasyon işlemi tamamlanmıştır. Lazerlerimizi test etmeden önce aşındırma gibi proseslerde oluşan kusurları minimize etmek için lazerlerimizi 1 dakika süreyle 400 °C'de tavladık (anneal). Bu tavlama işlemi yapılmadığı zaman lazerlerimizin çok zayıf karakteristik sergilediğini gözlemledik.

### 3. SİMÜLASYON (SIMULATION)

#### 3.1 Oran Denklemleri (Rate Equations)

Elektronlar ve fotonlar arasındaki enerji aktarım ilişkisini tanımlayan ve dalga denklemlerinden elde edilen oran denklemleri yarıiletken lazer çıkış karakteristiklerini tanımlamak için kullanılan popüler bir yöntemdir [3]. Yarıiletken lazer karakteristiklerini farklı açılardan incelemek için değişik formlarda oran denklemleri geliştirilmiştir [15-22]. Bu bölümde 1.3 ve 1.55 µm dalgaboylarında çalışan yarıiletken lazerlerin oran denklemleri kullanılarak çıkış gücü-akım (P-I) ve spektral karakteristiği incelenmiştir. Aynı zamanda P-I karakteristiğinin kavite uzunluğu ile değişimi de gösterilmiştir.

Tek bir mod için elektron oran denklemleri aşağıda gösterilmektedir [15-22].

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{q} - \gamma_e N - GP \quad (1)$$

Bu denklemde  $N$  ortamdaki elektron sayısını,  $I$  lazere uygulanan akımı,  $q$  elektron yükünü,  $\gamma_e$  taşıyıcı rekombinasyon oranını,  $G$  normalize kazancı ve  $P$  kavitedeki foton sayısını göstermektedir.

Eşik durumunda, taşıyıcı rekombinasyon oranı  $\gamma_e = \tau_e^{-1}$ , burada  $\tau_e$  taşıyıcı yaşam süresini göstermektedir. Bununla birlikte modelimizde, taşıyıcı yaşam süresinin taşıyıcıya bağımlılığı hesaba katıldığından  $\gamma_e$  aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\gamma_e = A + \frac{B}{V} N + \frac{C}{V^2} N^2 \quad (2)$$

Burada,  $A$  ışınımsal olmayan rekombinasyon oranını,  $B$  ışınımsal rekombinasyon oranını ve  $C$  Auger rekombinasyon sabitini göstermektedir.

Pompalamadan dolayı oluşan kazancı temsil eden normalize kazanç  $G$ , aşağıdaki formülle ifade edilebilir:

$$G = \Gamma v_g g = \frac{\Gamma v_g a(N - N_t)}{V} \quad (3)$$

Burada  $\Gamma$  foton gömülüm faktörünü (aktif katmanda gömülü kalan fotonların oranını),  $v_g$  grup hızını,  $g$  net kazancı,  $a$  diferansiyel kazancı,  $N$  elektron sayısını,  $N_t$  saydam durumda (transparency) elektronların sayısını,  $V$  aktif katmanın hacmini göstermektedir.

Tek bir mod için foton oran denklemleri ise aşağıdaki gibidir.

$$\frac{dP}{dt} = GP - \gamma P + R_{sp} \quad (4)$$

Burada  $\gamma=1/\tau_p$  kavite içindeki foton yaşam süresini tanımlamada kullanılan foton zayıflama oranını ve  $R_{sp}$  kendiliğinden emisyon oranını göstermektedir.

Kendiliğinden emisyon oranı  $R_{sp}$ , şu formülle ifade edilebilir:

$$R_{sp} = \frac{\beta_{sp} B}{V} N^2 \quad (5)$$

Bu eşitlikler kullanılarak bir yarıiletken lazerin simülasyonu gerçekleştirilebilir ve birçok lazer parametresinin lazer performansına etkisi elde edilebilir. Bu denklemlerin sürekli durum (steady-state) çözümleri, geçici durum (transient-state) olayları sona erdikten sonra lazerlerin CW modunda çalışmasını incelemek için kullanılabilir. Lazer performansı incelenirken genellikle iki sürekli durum karakteristiği öne çıkar. Bunlar çıkış gücü-akım (P-I) ve boylamsal mod spektrum karakteristikleridir.

### 3.1.1 P-I Karakteristiği (P-I Characteristics)

P-I karakteristiği tek mod oran denklemleri kullanılarak lazer çıkış gücünün lazere uygulanan akımla değişimini gösterir. Lazerin sürekli durum çalışmasını incelerken elektron ve foton sayısının zamanla değişmediği kabul edilebilir. Bu durumda zamana göre türevler sıfıra eşit olur ve elektron ve foton oran denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilebilirler.

$$\frac{I}{q} - \gamma_e N - GP = 0 \quad (6)$$

$$P = \frac{R_{sp}}{(\gamma - G)} \quad (7)$$

Ayrıca, lazer çıkış gücü ( $P_C$ ) aşağıdaki formülle verilmektedir:

$$P_C = \frac{1}{2} h\nu_g v\alpha_m (1 - |r_1|^2) P \quad (8)$$

Bu denklemde  $h$  Planck sabitini,  $\nu$  lazer osilasyon frekansını,  $\nu_g$  lazer modlarının grup hızını,  $\alpha_m$  lazer ayna kayıplarını,  $r_1$  ön yüzün (front facet) yansıtıcılığını ve  $P$  foton popülasyonunu göstermektedir.

### 3.1.2 Boylamsal Mod Spektrumu (Longitudinal Mode Spectrum)

Bir yarıiletken lazerin boylamsal mod spektrumunu elde etmek için çoklu mod oran denklemleri kullanılabilir. Çoklu mod oran denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir [3].

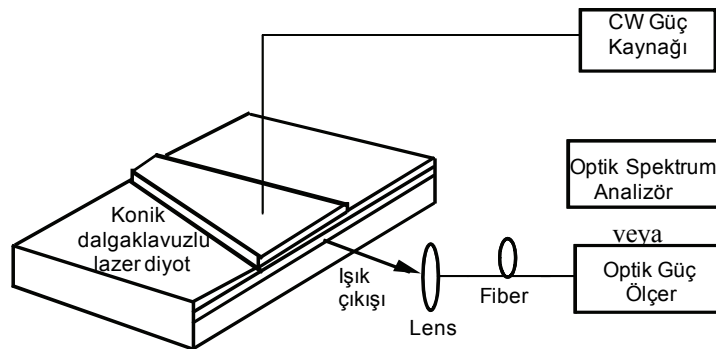
$$\frac{dP_m}{dt} = (G_m - \gamma_m)P_m + R_{sp}(\omega_m) \quad (9)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{q} - \gamma_e N - \sum_m G_m P_m \quad (10)$$

Bu denklemde  $R_{sp}(\omega_m)$  ilgili modun kendiliğinden emisyon oranını ve  $m$  indisi boylamsal mod numarasını göstermektedir. Çoklu mod oran denklemlerini çözmek için kazanç spektrumu da bilinmelidir. Çünkü lazer ortamının tüm modlara gösterdiği kazanç aynı değildir. Basit bir yaklaşım elde etmek amacıyla kazancın maksimum değerinden karesel olarak azaldığı düşünülebilir. P-I ve optik spektrum simülasyon sonuçlarını elde etmek için yukarıda verilen diferansiyel denklemler Tablo 1'de verilen parametreler kullanılarak, geliştirilen bir algoritma ile nümerik olarak çözüldü.

## 4. DENEY VE SİMÜLASYONUN KARŞILAŞTIRMALI SONUÇLARI (COMPARATIVE RESULTS OF EXPERIMENT AND SIMULATION)

Bu bölümde, konik dalgaklavuzlu 1300 nm (InGaAsP/InP) ve 1550 nm (AlGaInAs/InP) lazer diyotların modelleme ve deneysel ölçüm sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Şekil 1'de diyot lazerin ve deneysel ölçüm sisteminin şematığı gösterilmektedir. Ölçüm sisteminde kullanılan lens ile lazer çıkışı fiber kabloya odaklanmıştır. P-I karakteristiği elde edildiği zaman optik güç ölçer kullanılırken, optik spektrum ölçüldüğü zaman ise optik spektrum analizör kullanılmıştır. Lazer kavite boyu 600  $\mu\text{m}$  olup konik dalgaklavuzu 2°'lik bir konik açısına sahiptir. Konik dalgaklavuzu, düz bölümde 4  $\mu\text{m}$ 'lik genişlikte olup lazerin çıkış yüzünde 30  $\mu\text{m}$ 'lik bir genişliğe sahip olmaktadır.



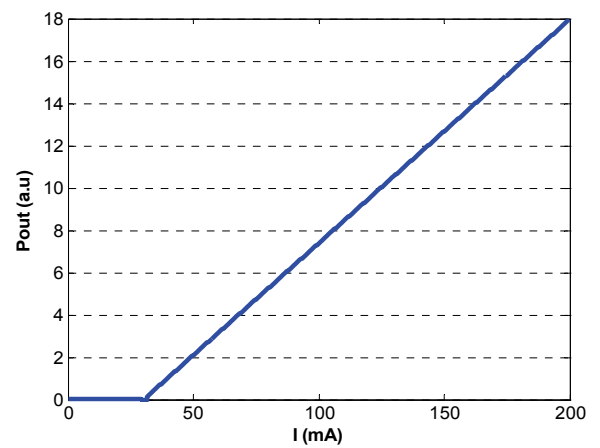
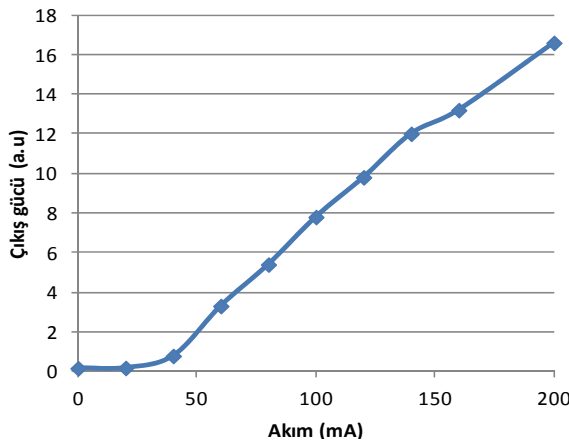
Şekil 1. Lazer diyotun ve deneysel ölçüm sisteminin şematığı (Schematic representation of the laser diode and experimental set-up)

**Tablo 1.** 1,3 ve 1,55  $\mu\text{m}$  dalgaboylarında yayılım yapan lazerler için tipik parametreler (Typical parameters of lasers operating in the wavelengths of 1.3 ve 1.55  $\mu\text{m}$ )

Parametre	Sembol	Değer
Işık hızı	$c$	$3 \times 10^8$ m/s
Elektron yükü	$q$	$1,6 \times 10^{-19}$ C
Kendiliğinden emisyon sabiti	$\beta_{sp}$	$10^{-3}$
Kavite uzunluğu	$L$	500 $\mu\text{m}$
Aktif katman genişliği	$w$	4 $\mu\text{m}$
Aktif katman kalınlığı	$d$	0,090 $\mu\text{m}$ (1300 nm için) 0,086 $\mu\text{m}$ (1550 nm için)
Foton hapsedme faktörü	$\Gamma$	0,3
Grup kırılma indisi	$\mu_g$	4
Çizgi genişliği iyileştirme faktörü	$\beta_c$	5
Ayna kayıpları	$\alpha_m$	$45 \text{ cm}^{-1}$
Dahili kayıplar	$\alpha_{int}$	$40 \text{ cm}^{-1}$
Kazanç sabiti	$a$	$2,5 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$
Saydamlık taşıyıcı yoğunluğu	$n_o$	$10^{18} \text{ cm}^{-3}$
Işınımsal olmayan rekombinasyon katsayısı	$A_{nr}$	$10^8 \text{ s}^{-1}$
Işınımsal rekombinasyon katsayısı	$B$	$10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$
Auger rekombinasyon katsayısı	$C$	$3 \times 10^{-29} \text{ cm}^6/\text{s}$
Eşik taşıyıcı popülasyonu	$N_{th}$	$2,14 \times 10^8$
Eşik taşıyıcı yaşam süresi	$\tau_e$	2,2 ns
Foton yaşam süresi	$\tau_p$	1,6 ps
Ön yüzün yansıtıcılığı	$r_l$	0,33
Dalgaboyu	$\lambda$	1300 nm 1550 nm

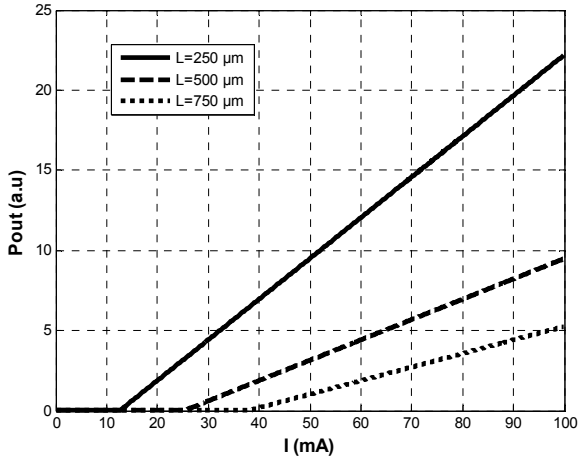
Şekil 2'de 1300 nm ve 1550 nm dalgaboyunda yayılım yapan lazerlerin cw çalışma şartları altında P-I karakteristiğinin ölçüm ve simülasyon sonuçları gösterilmektedir. Bu değişimlerin elde edilmesi için lazere 0 ile 200 mA arasında değişen bir DC akım uygulanmıştır. Şekil 2 incelendiğinde eşik akım değerine kadar lazer çıkış gücünün hemen hemen sıfır olduğu ve bu değerden sonra hızlı bir yükselişe geçtiği görülmektedir. P-I karakteristiği hem simülasyon hem de deneysel ölçümlerde benzer

karakteristik sergilemiş olup eşik akımı modelde 27 mA ve ölçümde ise 30 mA olarak elde edilmiştir. Akım artırıldıkça lazerin dominant yanıl modlarındaki değişimlerden dolayı deneysel olarak elde edilen P-I karakteristiğinde 150 mA civarında hafif bir kink (eğimde değişim) gözlemlenmektedir. Simülasyonda elde edilen harici kuantum verimliliği ölçüm ile elde edilenden yüksektir, çünkü ısınma, taşıyıcı sızıntısı ve küçük boyut kaynaklı etkiler simülasyonda ihmal edilmiştir.



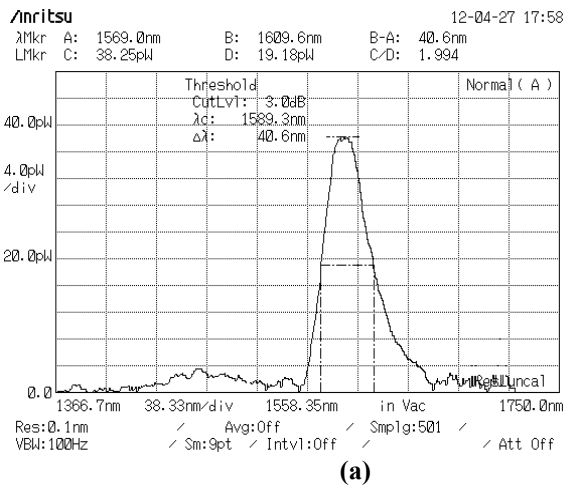
**Şekil 2.** 1300 ve 1550 nm lazer diyotlar için P-I eğrisi: **a)** Deneysel sonuç ve **b)** Simülasyon sonucu (P-I curve of 1300 and 1550 nm laser diodes: **a)** Experimental result and **b)** Simulation result)

Üretilen lazerlerin kavite uzunlukları 600  $\mu\text{m}$  ve şerit genişliği 4  $\mu\text{m}$ 'dir. Lazerlerimizin aktif katman kalınlıkları hemen hemen aynı olduğundan (1300 nm için 86 nm ve 1550 nm için 90 nm) P-I karakteristiği simülasyon ve deneysel ölçümlerde aynıdır (Şekil 2). Simülasyon sonuçlarının deneysel ölçümler ile oldukça yakın sonuçlar ürettiği görülmektedir. Buradan hareketle değişik kavite uzunlukları için simülasyon ile edilen P-I eğrileri Şekil 3'de gösterilmektedir. Burada kavite uzunluğunun artışıyla eşik akımının arttığı gözlemlenmektedir.



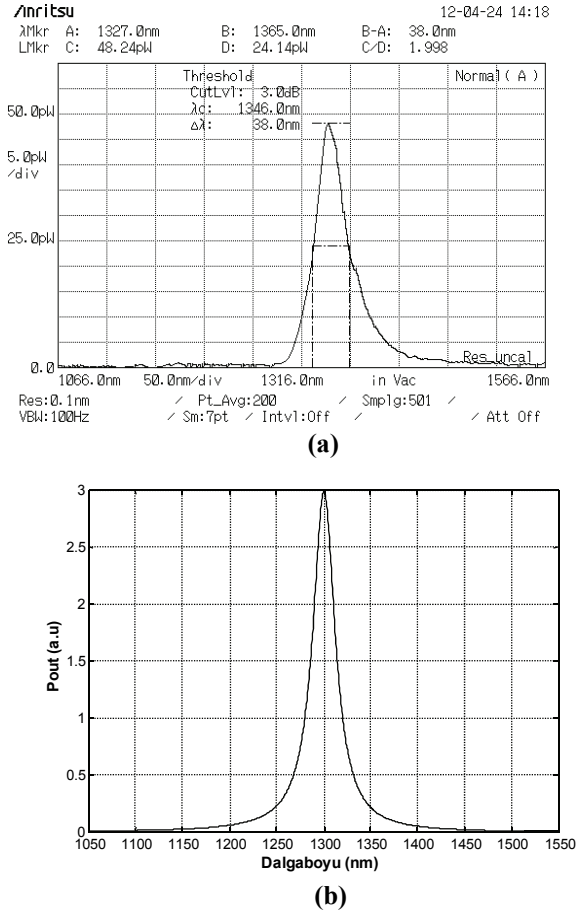
Şekil 3. 1300 nm ve 1550 nm lazerlerde farklı kavite uzunlukları için P-I eğrileri (P-I curves of the 1300 and 1500 nm laser diodes for various cavity lengths)

Şekil 3'de görüldüğü gibi, kavite uzunluğunun 250  $\mu\text{m}$ 'den 500  $\mu\text{m}$ 'ye çıkarılması ile eşik akımı 13 mA'den 28 mA'ye çıkmıştır. Bu durum, kavite uzunluğunun artışı sonucunda kayıpların da artmasıyla açıklanabilir. Fotonlar lazerin iki yüzü arasında yansıdığı için kavite uzunluğunun artırılmasıyla saçılma ve soğrulma gibi kayıplar da artmaktadır. Bunun sonucu olarak eşik akımı kavite uzunluğu ile orantılı olarak artmaktadır.



Şekil 5. 1550 nm lazer için boylamsal mod spektrumları: a) Deneysel sonuç ve b) Simülasyon sonucu (Longitudinal mode spectra of the 1550 nm laser diode: a) Experimental result and b) Simulation result)

Şekil 4 ve 5'de 1300 nm ve 1550 nm lazer diyotlar için lazer çıkış gücünün modlara dağılımı yani lazerin boylamsal mod spektrumu gösterilmektedir.



Şekil 4. 1300 nm lazer için boylamsal mod spektrumları: a) Deneysel sonuç ve b) Simülasyon sonucu (Longitudinal mode spectra of the 1300 nm laser diode: a) Experimental result and b) Simulation result)

**Tablo 2.** 1300 nm ve 1550 nm lazerlerin optik spektral değişimlerinden elde edilen sonuçlar (Results obtained from optical spectra of the 1300 nm and 1550 nm lasers)

	Merkez dalgaboyu		3-dB spektral genişlik	
	Ölçüm	Model	Ölçüm	Model
<b>1300 nm lazer için</b>	1346 nm (Fark: 46 nm)	1300 nm	38 nm (Fark: 10 nm)	28 nm
<b>1550 nm lazer için</b>	~1589 nm (Fark: 39 nm)	1550 nm	40.6 nm (Fark: 1.6 nm)	39 nm

Şekil 4 ve 5'de verilen optik spektrum değişimlerinden Tablo 2'de verilen sonuçlar elde edilmiştir. Her iki lazer tipi için ölçüm ve modelleme ile elde edilen merkez dalgaboylarında ve spektral genişliklerde birbirine yakın değerler elde edilmiştir. Merkez dalgaboyunda görülen kaymalar çoklu katmanlı malzemelerin büyütülmesi aşamasında oluşan toleranslardan dolayıdır. Nitekim epitaksiyel katmanları büyüten IQE firması da bunu teyit etmektedir. Yarı yükseklikte elde ölçülen spektral genişlikteki fark ise modellemede bozucu birçok etkinin (ısınma ve kayıplar gibi) ihmal edilmesinden dolayıdır. 1300 ve 1550 nm lazerler için elde edilen optik spektrumun (Şekil 4a ve 5a) düşen kenarında simetrikliğin bozulduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca 1550 nm lazerin optik spektrumunda merkezi spektrumdan önce küçük genlikli ikinci bir spektrum oluşmuştur. Fakat bu spektrumun genliği, merkezi spektrumun genliğinden yaklaşık 10 kat daha küçük olduğundan ihmal edilebilir (Şekil 5a). 3-dB spektral genişlik açısından bakıldığında zaman 1300 nm lazerlerde ölçüm ile simülasyon arasındaki fark 10 nm iken, 1550 nm dalgaboylu lazerlerde bu fark 1.6 nm civarındadır. Her iki tip lazer için modelleme parametreleri aynı seçildiğinden 1550 nm lazerler için deneysel ve simülasyon sonuçları birbirine oldukça yakın bulunmuştur.

Sonuç olarak 1300 nm lazerlerden 1550 nm lazerlere geçişte 3-dB spektral genişlik sadece 1.6 nm arttığından 1550 nm lazerlerin spektral kararlılıklarının daha iyi olduğu söylenebilir. Bu durum, Al (alüminyum) içeren dördü bileşiklerin P (fosfor) içerenlere göre daha iyi termal kararlılığa ve elektron gömülümüne sahip olmasından dolayı olabilir. Nitekim, AlGaInAs dördü malzeme yapıları ( $\Delta E_c/\Delta E_g=0,7$ ), InGaAsP ( $\Delta E_c/\Delta E_g=0,4$ ) malzemelerle karşılaştırıldığında daha büyük iletim band ofsetine sahip olduğundan, AlGaInAs QW ve bariyer içeren lazerler, soğutmaya ihtiyaç duyulmaksızın çalıştırılabilirler [23].

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, 1300 nm (InGaAsP/InP) ve 1550 nm (AlGaInAs/InP) dalgaboyunda çalışan lazer diyotların üretimi, karakterizasyon ölçümleri ve simülasyonu rapor edilmiştir. Kavite uzunlukları 600  $\mu$ m ve şerit

genişliği 4  $\mu$ m olan lazerler, çoklu kuvantum katmanlı, konik yapılı ve sırt dalgaklavuzludur. 1300 nm ve 1550 nm lazer diyotlarda simülasyon ve deneysel ölçümlerden elde edilen ışık çıkış gücü-akım (P-I) karakteristiği birbiriyle uyumlu olup eşik akımı modelde 27 mA ve ölçümde ise 30 mA olarak elde edilmiştir. Kavite uzunluğunun P-I karakteristiğine etkisini belirlemek için 250  $\mu$ m ve 500  $\mu$ m kavite uzunluklu lazerler karşılaştırılmış ve eşik akımının 13 mA'den 28 mA'ye çıktığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin kavite uzunluğunun artışı ile saçılma ve soğrulma gibi kayıpların da artmasından kaynaklandığı öngörülmektedir.

Uzun dalgaboylu lazerlerin spektral ölçümlerinde, büyütme aşamasındaki toleranslardan dolayı merkezi dalgaboyları 1346 nm ve 1590 nm olarak elde edilmiştir. Yarıiletken lazerlerde spektral saflığın önemli bir ölçütü spektral genişliktir. 1300 nm ve 1550 nm lazerlerde ölçülen spektral genişlik sırasıyla 38 nm ve 40.6 nm olarak elde edilmiştir. Simülasyon ile elde edilen spektral genişlikler, ısınma ve kayıplar gibi bozucu birçok etkinin ihmal edilmesinden dolayı daha kısa bulunmuştur. 1300 nm ve 1550 nm lazerlerin optik spektrumlarının düşen kenarlarında simetrikliğin bozulduğu ve 1550 nm lazerlerin dalgaboyu spektrumunda çok küçük genlikli bir spektral değişimin meydana geldiği gözlemlenmiştir. 3-dB spektral genişlik açısından 1550 nm lazerlerin 1300 nm olanlara göre deneysel ve simülasyon sonuçlarının yakınlığı bakımından daha iyi sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir. Buradan hareketle 1550 nm lazer diyotların spektral kararlılıklarının daha iyi olduğu söylenebilir. Sonuç olarak, bu çalışmada fabrikasyonu, deneysel ölçümleri ve modellemesi anlatılan 1550 nm lazerler fiber optik haberleşme sistemlerinde kullanılabilme potansiyeline sahiptir.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde yardımlarını esirgemeyen Dr. Mehmet Biber ve Dr. Tevhit Karacalı'ya teşekkürü bir borç biliriz. Üretim aşamasında Bilkent Üniversitesi İleri Araştırma Laboratuvarları Temiz Oda imkânlarından bizleri istifade ettiren Dr. Atilla Aydınlı'ya da teşekkür ederiz. Bu çalışmaya 107E163 nolu proje kapsamında sağladığı destekten dolayı TÜBİTAK'a da

teşekkürlerimizi sunarız. Ayrıca sırasıyla 2005/24 ve 2003K/07 nolu projeler ile sağladığı finansal destekten dolayı Atatürk Üniversitesine ve Devlet Planlama Teşkilatına (yeni adıyla Kalkınma Bakanlığına) da teşekkür ederiz.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Salehi, M.R. ve Cabon B., "Circuit Modeling of Quantum-Well Lasers for Optoelectronic Integrated Circuits (ICs) Including Physical Effect of Deep-Level Traps", **IEEE Journal of Quantum Electronics**, Cilt 38, No 11, 1510-1514, 2002.
2. [http://www.sans.org/reading\\_room/whitepapers/p\\_hysical/fiber-optics-security-vulnerabilities\\_1648](http://www.sans.org/reading_room/whitepapers/p_hysical/fiber-optics-security-vulnerabilities_1648).
3. Agrawal, G.P. ve Dutta, N.K., **Semiconductor Lasers**, Van Nostrand Reinhold, New York, A.B.D., 1993.
4. Alam, M.A., Hybertsen, M.S., Smith, R.K. ve Baraff G.A., "Simulation of Semiconductor Quantum Well Lasers", **IEEE Transactions on Electron Devices**, Cilt 47, No 10, 1917-1925, 2000.
5. Piskorski, L., Sarzala, R.P. ve Nakwaski, W., "Investigation of Temperature Characteristics of Modern InAsP/InGaAsP Multi-quantum-well TJ-VCSELs for Optical Fibre Communication", **Opto-Electronics Review**, Cilt 19, No 3, 320-326, 2011.
6. Yıldırım, R. ve Celebi, F., "Harmonic Amplitude Control in Laser Diodes with Non-linear Feedback", **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 25, No 1, 163-170, 2010.
7. Lin, Zr., Liu, Ck., Keiser, G., Lee, Sl., Lai, Kc., Chang, Hc., Tseng, Cl., Jou, Jj., "A Low-Cost Passive Optical Network For Television Broadcasting and High-Speed Bidirectional Communications in Intelligent Buildings", **Journal of the Chinese Institute of Engineers**, Cilt 33, No 5, 707-716, 2010.
8. Ab-Rahman, M.S., Hassan, M.R., "Theory of Cut-Off Temperature of Operation Of Uncooled Semiconductor Laser Diode", **European Physical Journal-Applied Physics**, Cilt 50, No 2, 2010.
9. Yoshino, M., Miki, N., Yoshimoto, N., Kumozaki, K., "Multiwavelength Optical Source for OCDM Using Sinusoidally Modulated Laser Diode", **Journal of Lightwave Technology**, Cilt 27, No 20, 4524-4529, 2009.
10. Tsai, Cl., Chou, Yl., Wang, Y.S., Chang, S.J., Wu, M.C. ve Lin, W., "1.3  $\mu\text{m}$  Strain-compensated InGaAsP Planar Buried Heterostructure Laser Diodes with a TO-Can Package for Optical Fiber Communications", **Journal of The Electrochemical Society**, Cilt 156, No 12, H903-H907, 2009.
11. Das, B.A., Sengupta, I. ve Basu, P., "A Simple Spice Model for Traveling Wave Semiconductor Laser Amplifier", **Microwave and Optical Technology Letters**, Cilt 46, No 7, 1558-1561, 2007.
12. Agrawal, G.P., "Power Spectrum of Directly Modulated Single-Mode Semiconductor Lasers: Chirp Induced Fine Structure", **IEEE Journal of Quantum Electronics**, Cilt 21, No 6, 680-686, 1985.
13. Morishita, M., Ohmi, A. ve Nishizawa, J., "Impedance Characteristics of Double Heterostructure Laser Diodes", **Solid State Electronics**, Cilt 22, No 11, 957-962, 1979.
14. Lee, T.P., Burrus, C.A., Copeland, J.A., Dentai, A.G. ve Marcuse, D., "Short Cavity InGaAsP Injection Lasers: Dependence of Mode Spectra and Single Longitudinal Mode Power on Cavity Length", **IEEE Journal of Quantum Electronics**, Cilt 18, No 7, 1101-1112, 1982.
15. Byrne, D.M. ve Keating, B.A., "A Laser Diode Model Based on Temperature Dependent Rate Equations", **IEEE Photonics Technology Letters**, Cilt 1, No 11, 356-359, 1989.
16. Krstic M.M., Crnjanski J.V. ve Gvozdic D.M., "Injection Power and Detuning Dependent Bistability in Fabry-Perot Laser Diodes", **IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics**, Cilt 18, No 11, 826-833 2012.
17. Alahyarizadeh G.H., Aghajani H., Mahmodi H., Rahmani R. ve Hassan Z., "Analytical And Visual Modeling of InGaN/GaN Single Quantum Well Laser Based on Rate Equations", **Optics and Laser Technology**, Cilt 44, No 1, 12-20, 2012.
18. Wang X. ve Chrostowski L., "High-Speed Q-Modulation of Injection-Locked Semiconductor Lasers", **IEEE Photonics Journal**, Cilt 3, No 5, 2011.
19. Schetzenia M. ve Yildirim R., "System Theory of the Single-Mode Laser-Diode", **Optics Communications**, Cilt: 219, No 1-6, 341-350, 2003.
20. Hassine L., Toffano Z., Lamnabhilagarrigue F., Destrez A. Ve Birocheau C., "Volterra Functional Series Expansions For Semiconductor Lasers under Modulation", **IEEE Journal of Quantum Electronics**, Cilt 30, No 4, 918-928, 1994.
21. Tucker R.S., "High Speed Modulation of Semiconductor Lasers", **Journal of Lightwave Technology**, Cilt: 3, No 6, 1180-1192, 1985.
22. Olshansky R., Hill P., Lanzisera V. ve Powazinik W., "Universal Relationship Between Resonant-Frequency and Damping Rate of 1.3  $\mu\text{m}$  InGaAsP Semiconductor Lasers", **Applied Physics Letters**, Cilt 50, No 11, 653-655, 1987.
23. Loyo-Moldonado, V. Mcdougall, S. D., Marsh, J.H., Aitchison, J.S., Button, C.C., "Demonstration of passive Q-switching in multi-quantum well InGaAs/AlGaInAs diode laser", **Electronics Letters**, Cilt 36, No 11, 952-953, 2000.