

# Bragg ve Çirpli Aynalı Tek Parça Yarıiletken Lazerler

## Monolithic Semiconductor Lasers with Bragg and Chirped Mirrors

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

<sup>1</sup>Erzurum Meslek Yüksekokulu  
Atatürk Üniversitesi  
caglarduman@atauni.edu.tr

<sup>2</sup>Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Atatürk Üniversitesi  
bcakmak@atauni.edu.tr  
Erzurum Teknik Üniversitesi  
bulent.cakmak@erzurum.edu.tr

### Özet

Yüksek hızlı optik haberleşme sistemleri için kısa süreli ve yüksek güçlü optik darbeler ihtiyacı duyulmaktadır. Bu şekilde haberleşme sisteminin sinyal gürültü oranı artırılarak uzun mesafelerde daha az tekrarlayıcı ile haberleşme sağlanabilir. İlgili dalga boyu aralığında yüksek yansıtıcılık sağlayan ve arzu edilen seviyede osilasyonsuz dispersiyon sergileyen Bragg ve çirpli aynalar kullanılarak, lazerlerin kısa süreli ve yüksek güçlü optik darbeler üretmeleri sağlanabilir. Bu çalışmada 1500nm dalga boylu AlGaInAs lazer için altı adet hava/yarıiletken tabakasından oluşan Bragg ve çirpli aynalar tasarlandı ve üretildi. Ayna tasarımlarının oluşturacakları yansıtıcılıklarının ve dispersiyonun hesaplanması için Matlab'da hazırlanan program kullanıldı. Tasarlanan aynaların fabrikasyonu için odaklamalı iyon ışın dağlama metodu kullanıldı. Üretilen aynaların, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile elde edilen fotoğrafları incelendiğinde bu yöntemle proses parametreleri optimize edilerek dik ve yeterince pürüzsüz tabakalar üretildiği görüldü.

### Abstract

Optical pulses with very short duration and high power are needed for high speed optical communication systems. Therefore signal to noise ratio of the system is increased and long haul communication can be achieved with fewer repeaters. Using lasers with Bragg and chirped mirrors can produce short duration optical pulses. In this study Bragg and chirped mirrors consisting of six air/semiconductor layer pairs have been designed and produced. Computer software prepared with Matlab has been used to calculate refractivity and dispersion of the mirrors. Focused ion beam etching method has been used to fabricate designed mirrors. It is seen from the photos of scanning electron microscope (SEM) that vertical and smooth layers are obtained by optimizing process parameters.

### 1. Giriş

Fiber optik haberleşme sistemlerinde yüksek spektral saflığa sahip optik darbeler ihtiyacı duyulması darbelerin kablo içinde farklı hızlarda ilerleyen, farklı frekanslardaki dalgaların birleşiminden oluşmuş gibi davranmasındandır. Bu durum optik darbelerin fiberde ilerlerken grup hızı dispersiyonuna uğramalarına ve sonuç

olarak genişliklerinin artmasına neden olur. Dispersiyonun yüksek miktarda gerçekleşmesi optik darbenin bitişiğindeki darbe ile iç içe geçmesine ve semboller arası (intersymbol) girişim oluşturmaya neden olur. Yüksek kapasiteli bilgi hatları elde etmek için bit oranının artırılması, optik darbelerin birbirine daha fazla yaklaşmasına ve dispersiyonun daha büyük bir problem olmasına neden olur [1]. Kısa süreli optik darbelerle bilgi aktarımı, yukarıda sözü edilen durumların oluşma ihtimallerini azaltacağından yüksek hızlı fiber optik haberleşme sistemlerinde bu tür optik darbeler kullanılır. Yarıiletken lazerlerin oluşturduğu optik darbelerin sürelerinin mümkün olduğunca kısaltılması için ise lazer kavitesi içinde oluşan dispersiyonun önlenmesi gerekir. Bu amaçla yarıiletken lazerlere, negatif dispersiyon sağlayan Bragg ve çirpli (chirped) aynalar eklenebilir.

Bragg aynaların belirli bir bant genişliği için yüksek yansıtıcılık sağlayabileceği bilinmektedir. Bu tip aynalar optik soğurma ve emisyon yapmak için rezonans kavitelerinin dizaynı için kullanılabilir [2]. Literatürde çeşitli yöntemlerle yarıiletken lazerlere farklı yapılar da Bragg aynalar üretildiği rapor edilmiştir. Bu aynaların lazerlere eklenmesi ile lazerlerin eşik akımlarının azaldığı ve daha yüksek güçlü optik darbeler ürettikleri gözlemlenmiştir [3-7]. Bragg aynaların, lazerin daha kararlı davranmasını sağladığı da rapor edilmiştir [8-10]. Ayrıca yapılan bir çalışmada DBR aynaya sahip kazanç kılavuzlu lazerlerin tek dalga boyunda çalışması için lazerin tek kenarında ayna bulunmasının yeterli olduğu ve lazer kenarına yansıtmayan kaplama (antireflecting-AR coating) yapılmasının sahte Fabry Perot modlarını bastırıldığı rapor edilmiştir [11]. Çirpli aynalar, Bragg aynalardan daha geniş bant aralığında yüksek yansıtıcılık gösteren ve daha yüksek negatif dispersiyon sağlayan yapılardır [12]. Optik darbelerin, çirpli ayna yüzeyinden bir kez yansmasıyla, lazer kavitelerinde oluşan dispersiyonu telafi etmek için gerekli olan miktarda negatif dispersiyon elde edilebilir ve femto saniye süreli optik darbeler üretilebilir [13]. Literatürde yer alan bir çalışmada 1.3µm dalga boyunda çalışan iki bölmeli lazer için çirpli aynalar tasarlanmış ve geniş bant aralığında yüksek yansıtıcılık ve dispersiyon kompanzasyonu elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışma ile yarıiletken lazerlerde ilk kez dispersiyon kompanzasyonu amacıyla hava/yarıiletken tabakalarından oluşan çirpli aynaların kullanılması önerilmiştir. Hava ve yarıiletkenin kırılma indisi farkının

yüksek oluşu sayesinde az sayıdaki tabaka ile geniş bant aralıklarında yüksek yansıtıcılık üreten aynalar elde edilebileceği bildirilmiştir [14]. Sonraki yıllarda yapılan bir çalışmada ise odaklamalı iyon ışın dağlama (focused ion beam etching – FIBE) ile üretilen ve hava/yarıiletken tabakalarından oluşan çirpli aynaya sahip yariletken lazerin 8mA dolaylarında düşük bir eşik akımına sahip olduğu rapor edilmiştir [15]. FIBE tekniği tek başına ya da başka tekniklerle birlikte kullanılarak yukarıda ele alınan Bragg ve çirpli aynalarının üretiminde kullanılabilir [15-19]. Örneğin FIBE tekniği kullanılarak gerçekleştirilen bir çalışmada lazer yüzeylerinin yansıtıcılıklarının değiştirildiği ve bu sayede çok modlu yayılım yapan lazerin, tek modlu çalışmasının sağlandığı bildirilmiştir [20]. Başka bir çalışmada ise FIB dağlama ile InGaN lazer diyota, Bragg ayna üretildiği ve lazerin eşik akımının %13 düşürüldüğü rapor edilmiştir [21].

Bu çalışmada, Bölüm 2.1, 2.2 ve 2.3’de Bragg ve çirpli aynaların fiziksel özellikleri hakkında bilgi verilmiş ve bu aynaların yansıtıcılık ve dispersiyon hesaplamaları anlatılmıştır. Ardından 1500nm dalga boyu için tasarlanan ve altı hava/yarıiletken tabakadan oluşan Bragg ve çirpli aynalar için yansıma ve dispersiyonun dalga boyuna bağımlı değişimini gösteren grafikler sunulmuştur. Bölüm 2.4’de ise bu ayna yapılarının yariletken lazer üzerine FIB dağlama ile fabrikasyonu anlatılmış ve fabrikasyon sonuçları sunulmuştur. Son bölümde ise elde edilen sonuçlar özetlenmiş ve tartışılmıştır.

## 2. Ayna Tasarımları

### 2.1. Bragg ve Çirli Aynalar

Taşıyıcı yoğunluğuna bağlı olarak ortaya çıkan kendiliğinden faz modülasyonu (self phase modulation SPM) çirp, grup hızı dispersiyonuna (group velocity dispersion) veya grup gecikme dispersiyonuna (group delay dispersion) neden olur. SPM ve yüksek mertebeli dispersiyon optik darbenin spektral genişlemesine neden olur ve çok kısa süreli optik darbelerin elde edilmesine engel olur. SPM ve GDD’nin etkileri, lazer harici kavitesinde optik elemanlar kullanılarak azaltılabilir. Örneğin, mod kilitli yariletken lazerle birlikte Gires-Tournois girişimölçer (Gires-Tournois interferometer - GTI), kullanılarak kavitede oluşan çirp telafi edilebilir. GTI büyük miktarda dispersiyon oluşturabilen basit cihazlardır. Ancak GTI’ların bant genişlikleri sınırlıdır [14]. Negatif dispersiyon oluşturabilen tabakalardan oluşan aynalar kullanılarak da lazer ortamının neden olduğu dispersiyon giderilebilir. Eşit kalınlıktaki tabakalardan oluşan çeyrek dalga Bragg aynalar kısa süreli optik darbe üretiminde her zaman istenilen performansı sağlayamamaktadır. Çünkü bu yapılarda kullanılan yariletkenlerin kırılma indislerinin farkı sınırlıdır. Ayrıca çeyrek dalga Bragg aynalar yüksek dereceli grup gecikme dispersiyonu (GDD) oluştururlar. Dispersiyonun giderilmesi amacıyla tek çirpli (single chirped) aynalar kullanılarak femto-saniye süreli optik darbeler elde edilebilir. Tek çirpli aynalarda her bir tabaka çiftinin Bragg dalga boyu farklı seçilerek uzun dalga boylarının, kısa dalga boylarına göre aynaya daha fazla nüfuz etmeleri sağlanır. Bu tip aynalarda yüksek yansıtıcılık bant genişliği artsa da, aynaların dispersiyon karakteristiği çok kısa optik darbe üretimi için uygun değildir. Çünkü tek çirpli aynalar, grup gecikme osilasyonları oluşturur ve oluşan bu osilasyonlar aynanın kullanılabilir bant genişliğini sınırlar. Osilasyonlardan kurtulmak için çift çirpli (double chirped) aynalar kullanılır.

Bu yapılarda ek kaplama tabakası kullanılır ve çirpli ayna kısmının empedansı, kaplamanın yüksek veya alçak kırılma indisli tabakasına uydurulur. Bu tabakalara eklenen yansıtmayan (anti-reflection-AR) kaplama ile ortamları aynanın empedans uygunluğu sağlanır [22, 23].

### 2.2. Ayna Yansıtıcılığı ve Dispersiyon Hesabı

$E_0(t)$  şeklindeki bir optik darbe, Fourier bileşenlerinin fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$E_0(t) = \int E(\omega)^{-i\omega t} d\omega \quad (1)$$

Burada  $\omega$  ve  $t$  sırasıyla açısal frekansı ve zamanı gösterir. Bu darbenin, aynadan yansımalarını incelemek için aynanın yansıtıcılığı  $R(\omega)$ ’yi aşağıdaki gibi ifade edebiliriz.

$$R(\omega) = r e^{+i\phi(\omega)} = r e^{+i\omega t_d} \quad (2)$$

Bu ifadede  $r$  ayna yansıtıcılığının büyüklüğünü ifade eden reel bir sayıdır.  $\phi(\omega)$  ise frekansa,  $t_d$  orantılı sabiti ile lineer olarak bağımlı ve tüm faz etkilerini gösteren bir büyüktür. Bu durumda ideal aynadan yansıyan optik darbe  $E_r(t)$  aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$E_r(t) = r \int E^{-i\omega(t-t_d)} d\omega = r E(t - t_d) \quad (3)$$

Denklem 3, ideal aynadan yansıyan darbenin  $r$  kadar ölçekleneceğini ve  $t_d$  kadar gecikeceğini ifade eder. Bu yansıma şartı ancak aynanın ideal gibi davrandığı yani sabit grup gecikmesi sağladığı durumda gerçekleşebilir. Ancak yüksek dalga boyu aralıklarında hiçbir optik sistem ideal davranamaz ve grup gecikme miktarı  $t_d$  frekansa bağımlı olur. Bu durumda aynadan yansıyan optik darbenin durumunu gözlemlemek için aynanın tüm faz etkilerini gösteren  $\phi(t)$ ,  $\omega_0$  merkez frekansı etrafında Taylor serisine açılarak aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\phi(\omega) = \phi(\omega_0) + \phi'(\omega_0)(\omega - \omega_0) + \frac{\phi''(\omega_0)(\omega - \omega_0)^2}{2!} + \frac{\phi'''(\omega_0)(\omega - \omega_0)^3}{3!} + \dots \quad (4)$$

Bu eşitlikte üslü terimler açısal frekansa göre türev işlemini gösterir ve türev içeren bileşenler, optik darbenin maruz kalacağı dispersiyonla ilgilidir. Aynanın yansıtıcılığının ve dispersiyonunun hesaplanması aynanın transfer matrisinin yazılabilmesine bağlıdır. Kayıpsız dielektrik tabakalardan oluşan bir aynanın transfer matrisi aşağıdaki gibidir.

$$T_{(n,0)} = \begin{bmatrix} a(\omega) & b(\omega) \\ b^*(\omega) & a^*(\omega) \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} |a(\omega)| \exp(i\phi_a) & |b(\omega)| \exp(i\phi_b) \\ |b(\omega)| \exp(-i\phi_b) & |a(\omega)| \exp(-i\phi_a) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Bu ifadede  $a^*(\omega)$  ve  $b^*(\omega)$  sırasıyla  $a(\omega)$  ve  $b(\omega)$  kompleks sayılarının eşleniğidir. Transfer matrisi yardımıyla aynanın kompleks yansıma katsayısı,

$$R(\omega) = (\omega) = |R(\omega)| \exp[i\phi(\omega)] = - \frac{b^*(\omega)}{a^*(\omega)} \quad (6)$$

olur. Bu durumda yansıma katsayısının fazı,

$$\phi(\omega) = \phi_a(\omega) - \phi_b(\omega) + \pi \quad (7)$$

olur. Dolayısıyla k'nıncı dereceden dispersiyon,

$$\phi^{(k)}(\omega) = \phi_a^{(k)} - \phi_b^{(k)} \quad (8)$$

ifadesi ile hesaplanabilir. Burada üs olarak yazılan k, açılış frekansa göre kaç kez türev alındığını ifade eder. k'nıncı dereceden türevli matris terimleri doğrudan transfer matrisinin türevi alınarak hesaplanabilir. Ancak türev alınırken transfer matrisin, diğer tabakaların transfer matrislerinin çarpımından oluştuğu göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca türevler hesaplanırken aşağıdaki bildik, başlangıç matrislerine ihtiyaç duyulur.

$$T_{(0,0)} = I \quad (9a)$$

$$\frac{\partial^k T_{(0,0)}}{\partial \omega^k} = 0, 0 < k \leq m \quad (9b)$$

Bu ifadelerde m alınacak en yüksek türev mertebesini ve I birim matrisi gösterir.  $n_1$ , l'inci tabakanın kırılma indisini ve  $\tilde{n}_l(\omega) = n_l(\omega) \cos \theta$  dalğanın tabaka yüzeyine geliş açısı  $\theta$ 'yı hesaba katan etkin kırılma indisini göstermek üzere 5 numaralı denklemde gösterilen matrisin elamanları aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$a(\omega) = [1 + p_l(\omega)]e^{[-i\tilde{n}_l(\omega)d_l\omega/c]} \quad (10a)$$

$$b(\omega) = [1 - p_l(\omega)]e^{[-i\tilde{n}_l(\omega)d_l\omega/c]} \quad (10b)$$

Bu ifadede c boşluktaki ışık hızını,  $p_l$  tabakaların kırılma indisi oranlarını ve  $d_l$  tabakaların kalınlıklarını ifade eder.  $p_l$  enine elektrik (TE) ve enine manyetik (TM) dalgalar için aşağıdaki formüllerle hesaplanır [24].

$$p_l(\omega) = \begin{cases} \frac{\tilde{n}_{l-1}(\omega)}{\tilde{n}_l(\omega)} & \text{TE dalga} \\ \frac{\tilde{n}_{l-1}(\omega)n_l^2(\omega)}{\tilde{n}_l(\omega)n_{l-1}^2(\omega)} & \text{TM dalga} \end{cases} \quad (11)$$

Aynadan yansıyan optik darbenin maruz kaldığı grup gecikmesi olarak tanımlanan dispersif zaman gecikmesi (group delay- $\tau_g$ ) ve grup gecikme dispersiyonu (group delay dispersion-GDD) aşağıdaki ifadelerle hesaplanabilir [14].

$$\tau_g = -\frac{d\phi}{d\omega} \quad (12a)$$

$$GDD = \frac{d\tau_g}{d\omega} \quad (12b)$$

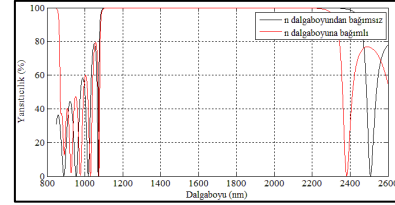
Bu çalışma kapsamında, TE dalgalar için hava/yarıiletken tabakalarından oluşan çeşitli ayna modelleri incelenmiştir.

### 2.3. Ayna Tasarımları

MATLAB'da hazırlanan yazılımla, altışar adet hava/yarıiletken tabakalarından oluşan aynaların yansıtıcılıkları, grup gecikmeleri ve grup gecikme dispersiyonları hesaplandı. Yapılan hesaplamalar altı adet hava/yarıiletken çiftinden oluşan Bragg aynada, hava aralıklarının genişliği 375nm ve yarıiletken tabakaların kalınlıkları 107.143nm olmasının uygun olduğunu gösterdi. Bu değerler için elde edilen aynanın yansıtıcılığının, dalga

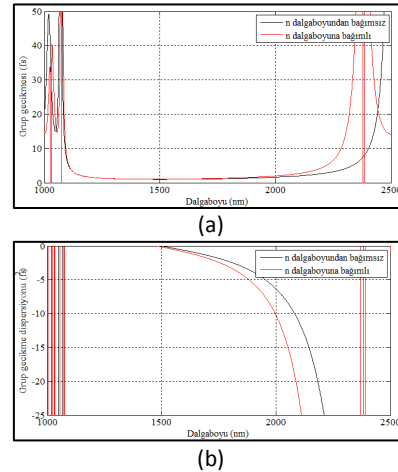
boyu ile değişimi Şekil 1'de gösterilmektedir. Bu grafikte yarıiletken tabakaların kırılma indislerinin hem sabit olduğu hem de dalga boyuna bağlı olduğu durumlardaki ayna yansıtıcılıkları gösterilmektedir. Yarıiletken tabakaların kırılma indisinin  $\lambda$  ile gösterilen dalga boyuna bağlı değişimini elde etmek için aşağıdaki eşitlik kullanıldı [15].

$$n^2(\lambda) = 8.896 + \frac{1.814\lambda^2}{\lambda^2 - 0.587} \quad (13)$$



Şekil 1: Bragg ayna yapısının yansıtıcılığının dalga boyu ile değişimi

Şekil 2'de ise aynı yapının grup gecikmesinin ve grup gecikme dispersiyonunun dalga boyu ile değişimi gösterilmektedir.



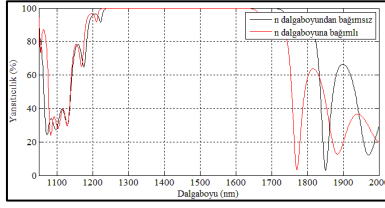
Şekil 2: Bragg ayna için hesaplanan grup gecikmesinin ve grup gecikme dispersiyonunun dalga boyu ile değişimi; (a) Grup gecikmesi (b) Grup gecikme dispersiyonu

Lazerele, altı adet hava/yarıiletken çiftinden oluşan çirpli ayna üretmek için uygun görülen tasarım Çizelge 1'de gösterilmektedir.

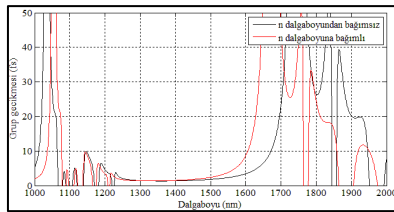
Çizelge 1: Çirpli ayna yapısı

Hava Tabakaları	Tabaka Kalınlığı (nm)	Yarıiletken Tabakaları	Tabaka Kalınlığı (nm)
1	277.2	1	310.9
2	327.1	2	311.1
3	353.4	3	311.3
4	371.9	4	311.5
5	386.5	5	311.7
6	398.5	6	311.9

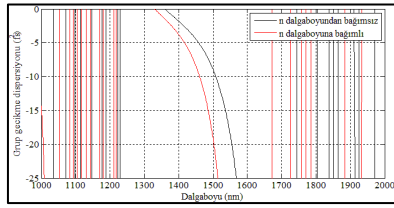
Çizelge 1'deki değerler kullanılarak elde edilen aynanın yansıtıcılığının, dalga boyuna bağlı değişimini Şekil 3'deki gibidir. Ayrıca bu çizelgedeki değerler kullanılarak elde edilen aynanın grup gecikmesinin ve grup gecikme dispersiyonunun dalga boyuna bağlı değişimi Şekil 4'de gösterilmektedir.



Şekil 3: Çizelge 1 kullanılarak elde edilen aynanın yansıtıcılığının, dalga boyuna bağlı değişimini gösteren grafik



(a)



(b)

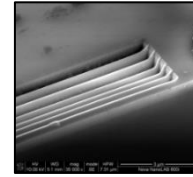
Şekil 4: Çizelge 1'deki değerler kullanılarak elde edilen çirpli aynanın grup gecikmesinin ve grup gecikme dispersiyonunun, dalga boyuna bağlı değişimi; (a) Grup gecikmesi (b) Grup gecikme dispersiyonu

Tüm bu şekiller incelendiğinde aynaların yalnızca altı adet hava/yarıiletken çiftinden meydana gelmelerine rağmen hem Bragg aynaların hem de çirpli aynaların çok geniş dalga boyu aralıkları için yüksek yansıtıcılık gösterdikleri görülür. Çirpli aynaların, Bragg aynalara nazaran daha kısa dalga boyu aralıklarında daha yüksek grup gecikme dispersiyonu oluşturabileceği de görülmektedir. Ayrıca yarıiletken tabakaların kırılma indislerinin dalga boyuyla değişimi hesaba katıldığında yansıma, grup gecikmesi ve grup gecikme dispersiyon grafiklerinde bir miktar değişme olduğu gözlemlenir.

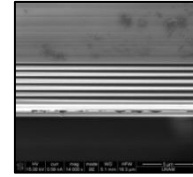
#### 2.4. Ayna Fabrikasyonu

FIBE metodunda genellikle düşük enerjili (20-30 keV), sıvı metal iyon kaynaklarından elde edilen iyonlar kullanılmaktadır. Üzerinde model oluşturacak numune, bu iyon demeti ile taranır. Oluşturulacak modele ve desenin derinliğine bağlı olarak kullanılan prob akımı ve iyon enerjisi ayarlanmalıdır. FIB sistemleri sıklıkla taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile birleştirilmiş olarak kurulurlar. Bu sistemlerle numune üzerine iyon

bombardmanı yapılırken aynı anda görüntüleme de gerçekleştirilebilir. Birkaç nanometre doğrulukla dağlama yapabilen FIB metodu, küçük boyutlu birçok optoelektronik cihazın fabrikasyonunda kullanılabilir [15]. Tasarlanan altı adet hava/yarıiletken çiftinden oluşan Bragg ve çirpli aynaları üretmek için yalnızca FIB dağlama metodu kullanıldı. Lazerin fiziksel yapısı incelendiğinde ayna tabakalarının 450nm derinliğinde ve 50µm genişliğinde seçilmesinin yeterli olacağı görüldü. Bragg aynalarda hava aralıklarının genişliği yaklaşık olarak 375nm ve yarıiletken tabakaların kalınlıkları yaklaşık olarak 110nm olarak seçilirken çirpli aynalar için yaklaşık olarak Çizelge 1'deki değerler kullanıldı. Aynaların fabrikasyonu için değişik FIB dağlama parametreleri denendi. Yapılan çalışmalar sonucunda prob akımının 28pA, iyon enerjisinin 30keV veya prob akımının 0.28nA, iyon enerjisinin 30kV seçilmesi durumlarında düzgün tabakalar elde edildiği görüldü. Elde edilen Bragg ve çirpli aynaların SEM fotoğrafları Şekil 5 ve 6'da gösterilmektedir.



Şekil 5: Bragg ayna yapısının SEM fotoğrafı



Şekil 6: Çirpli ayna yapısının SEM fotoğrafı

### 3. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında yarıiletken lazerlerin performanslarının artırılması ve dispersiyon karakteristiklerinin iyileştirilmesi için kullanılan çeyrek dalga Bragg ve çirpli ayna yapıları modellendi. Tasarlanan aynaların yüksek dalga boyu aralıklarında hem yüksek yansıtıcılık göstermeleri hem de istenilen seviyede negatif dispersiyon sağlayabilmeleri amaçlandı. Yalnızca altı adet hava/yarıiletken çifti kullanılarak Bragg ve çirpli aynalardan yüksek yansıtıcılık elde edilebildiği gösterildi. Ancak Bragg aynalarda tabaka kalınlıkları özdeş olduğundan yapının grup gecikme ve grup gecikme dispersiyonunun kontrolü gerçekleştirilemedi. Değişen kalınlıktaki tabakalardan meydana gelen çirpli aynalarda ise istenilen seviyede grup gecikmesi ve grup gecikme dispersiyonu elde edilebildi.

Tasarlanan aynaların fabrikasyonu için FIB dağlama metodu kullanıldı. Bu metotla lazerlerin aktif bölgelerine kadar uzanan derinlikte hava/yarıiletken tabakalar üretilmesi amaçlandı. Üretilen aynaların SEM fotoğrafları incelendiğinde bu yöntemle dik ve yeterince pürüzsüz tabakalar üretildiği görüldü. Ancak FIB cihazındaki birçok parametre tabaka yapılarını çok etkilediğinden, fabrikasyon için çok hassas ayarlamalar yapıldı. Gerçekleştirilen proses

ile sadece FIB dağlama metodu ile çok derin tabakaların elde edilmesinin zor olduğunu görüldü. Ayrıca aynı dağlama parametreleri ile 1µm derinliğinde dağlama yapıldığında tabakaların hem dik olmadıkları hem de yeterince pürüzsüz olmadıkları görüldü.

Ultrakısa süreli (femtosaniye) optik darbeler üretme kabiliyetine sahip olan bu tip diyot lazerlerin endüstriyel olarak kıtalararası fiber optik haberleşme sistemlerinde kullanılabileceği düşünülmektedir.

#### 4. Teşekkür

Bu çalışma Atatürk Üniversitesi tarafından 2012/1129 numaralı bilimsel araştırma projesi kapsamında desteklenmiştir. Ayrıca bu çalışmada 107E163 numaralı TÜBİTAK projesi kapsamında üretilen InP tabanlı AlGaInAs yarıiletken yapı kullanılmıştır.

#### 5. Kaynaklar

- [1] Gray, G.R., (Goving P. Agrawal), Applications of Semiconductor Lasers. Semiconductor Lasers Past Present and Future, American Institute of Physics, New York, 1994.
- [2] Murtaza, S. S., Anselm, K. A., Srinivasan, A., Streetman, B. G., Campbell, J. C., Bean, J. C. and Peticolas L., High reflectivity Bragg mirrors for optoelectronic applications, IEEE Journal of Quantum Electronics, 31 (10), 1819-1825, 1995.
- [3] Krauss, T. F., Painter, O., Roberts, J. S. and Rue, R. M. D. L., Photonic microstructures as laser mirrors, Optical Engineering, 37 (4), 1143-1148, 1997.
- [4] Ariga, M., Sekido, Y., Sakai, A., Baba, T., Matsutani, A., Koyama, F. and Iga, K., Low threshold GaInAsP lasers with semiconductor/air distributed Bragg reflector fabricated by inductively coupled plasma etching, Japanese Journal of Applied Physics, 39 (6A), 3406-3409, 2000.
- [5] Studenkov, P.V., Xia, F., Gokhale, M.R. and S. R. Forrest, Asymmetric twin-waveguide 1.55µm wavelength laser with a distributed Bragg reflector, IEEE Photonics Technology Letters, 12 (5), 468-470, 2000.
- [6] Raffaele, L., Rue, R.M.D.L., Roberts, J.S. and Krauss T.F., Edge-emitting semiconductor microlasers with ultrashort-cavity and dry-etched high reflectivity photonic microstructure mirrors, IEEE Photonics Technology Letters, 13 (3), 176-178, 2001.
- [7] Raffaele, L., Rue, R.M.D.L. and Krauss T.F., Ultrashort in-plane semiconductor microlasers with high-reflectivity microstructured mirrors, Optical and Quantum Electronics, 34 (1-3), 101-111, 2002.
- [8] Cho, J., Cho, S., Kim, B. J., Chae, S., Sone, C., Nam, O. H., Lee, J. W., Park, Y. and Kim, T. I., InGaN/GaN multi-quantum well distributed Bragg reflector laser diode, Applied Physics Letters, 76 (12), 1489-1491, 2000.
- [9] Kroeger, F., Breunig, I. and Buse, K., Frequency stabilization and output power undulations of diode lasers with feedback by volume holographic gratings, Applied Physics B, 95 (3), 603-608, 2009.
- [10] Fricke, J., Bugge, F., Ginolas, A., John, W., Klehr, A., Matalla, M., Ressel, P., Wenzel, H. and Erbert, G., High-power 980nm broad-area lasers spectrally stabilized by surface bragg gratings, IEEE Photonics Technology Letters, 22 (5), 284-286, 2010.
- [11] Dias, N.L., Reddy, U., Garg, A., Young, J.D., Verma, V.B. and Coleman, J.J., Wide-stripe distributed Bragg grating lasers with very narrow spectral linewidth, IEEE Journal of Quantum Electronics, 47 (3), 293-299, 2011.
- [12] Kartner, F. X. , Matuschek, N., Schibli, T. and Keller, U., Design and fabrication of double chirped mirrors, Optics Letters, 22 (11), 831-833, 1997.
- [13] Paschotta, R., Spuhler, G. J., Sutter, D. H., Matuschek, N., Keller, U., Moser, M., Hovel, R., Scheuer, V., Angelow, G. and Tschudi, T., Double-chirped semiconductor mirror for compensation in femtosecond lasers, Applied Physics Letters, 75 (15), 2166-2168, 1999.
- [14] Çakmak, B., Karacalı, T. and Yu, S., Theoretical investigation of chirped mirrors in semiconductor lasers, Applied Physics B, 81 (1), 33-37, 2005.
- [15] Çakmak, B., Karacalı, T., Ren, Z. and Yu, S., Fabrication of highly refractive gratings in 1.5 µm semiconductor lasers using focused ion beam-based etching, Microelectronic Engineering, 87 (11), 2343-2347, 2010.
- [16] Remiens, D., Menigaux, L., Ben, G., Gierak, J. and Sudraud, P., GaAs/AlGaAs double heterostructure laser monolithically integrated with passive waveguide using focused ion beam etching, Electronics Letters, 25 (20), 1400-1402, 1989.
- [17] Yoda, H., Ikedo, H., Ketsuka, T., Irie, A., Shiraishi, K. and Tsai, C.S., A high-performance micro-GRIN-chip spot-size converter formed with focused ion beam, IEEE Photonics Technology Letters, 18 (14), 1554-1556, 2006.
- [18] Zhang, Z.Y., Luxmoore, I.J., Jiang, Q., Liu, H.Y., Groom, K.M., Childs, D.T., Hopkinson, M., Cullis, A.G. and Hogg, R.A., Broadband quantum dot superluminescent LED with angled facet formed by focused ion beam etching, Electronics Letters, 43 (10), 587-588, 2007.
- [19] Yang, J., Bhattacharya, P. and Wu, Z., Monolithic integration of InGaAs-GaAs quantum-dot laser and quantum-well electroabsorption modulator on silicon, IEEE Photonics Technology Letters, 19, 747-749, 2007.
- [20] Down, P., Raddatz, L., Sumaila, Y., Asghari, M., White, I.H., Penty, R.V., Heard, P.J., Allen, G.C., Schneider, R.P., Tan, M.R.T. and Wang, S.Y., Mode control in vertical-cavity surface-emitting lasers by post-processing using focused ion-beam etching, IEEE Photonics Technology Letters, 9 (9), 1193-1195, 1997.
- [21] Marinelli, C., Sargent, L.J., Wonfor, A., Rorison, J.M., Penty, R.V., White, I.H., Heard, P.J., Hasnain, G. and Schneider, R., Threshold current reduction in InGaN MQW laser diode with  $\lambda/4$  air/semiconductor Bragg reflectors, Electronics Letters, 36 (20), 1706-1707, 2000.
- [22] Matuschek, N., Kartner, F.X. and Keller, U., Theory of double-chirped mirrors. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 4 (2), 197-208, 1998.
- [23] Matuschek, N., Theory and Design of Double-Chirped Mirrors, Ph.D. Thesis, Swiss Federal Institute of Technology Zürich, Zurich, 1999.
- [24] Birge, J.R. and Kartner, F.X., Efficient analytic computation of dispersion from multilayer structures, Applied Optics, 45 (7), 1478-1483, 2006.