



دانشگاه الزهراء (س)

دانشکده علوم پایه

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد  
رشته فیزیک گرایش اتمی مولکولی

موضوع:

مدل سازی و آنالیز رفتار استاتیک لیزرهای نیمرسانا  
با فیدبک توزیع شده و کوپلینگ بهره

استاد راهنما:

دکتر فاطمه شهشهانی

استاد مشاور:

دکتر وحید احمدی

دانشجو:

مریم علیان نژادی

شهریور ۸۸

## چکیده

در این پایان نامه مدل سازی و آنالیز لیزرهای DFB با کوپلینگ بهره، در شرایط آستانه و بالای آستانه و در حالت پایدار زمانی، انجام شده است. ساختارهای با کوپلینگ بهره در دو نوع کوپلینگ مختلط، CGC-DFB، و کوپلینگ خالص، PGC-DFB، در نظر گرفته شده و وابستگی آنها به مشخصات هندسی ساختار و توری در دو نوع مذکور مورد بررسی قرار گرفته است. محاسبات نشان می دهد که ساختارهای با توری متقارن دارای بیشترین ضریب کوپلینگ بوده و ضریب کوپلینگ با افزایش دامنه شیارهای توری افزایش می یابد. چگالی جریان آستانه ساختارهای با کوپلینگ مختلط با افزایش طول کاواک کاهش یافته و برای طولهای بیش از ۲۰۰ میکرومتر به کمتر از  $10 \text{ kA/cm}^2$  کاهش می یابد. میزان عملکرد تک مد لیزر با کمیت SMSR (Side Mode Suppression Ratio) و اختلاف بهره آستانه مد اول و مد دوم ارزیابی شده است. کمیت SMSR در بعضی ساختارهای CGC-DFB به مقادیری بیش از  $40 \text{ dB}$  نیز افزایش می یابد. پایداری ساختارهای CGC-DFB و PGC-DFB در مقابل اثر چاله-سوزی فضایی، SHB، بررسی و با یکدیگر مقایسه شده است.

به منظور افزایش پایداری لیزر در مقابل اثر SHB برای اولین بار در این پایان نامه در لیزرهای با کوپلینگ بهره ساختارهای با توری غیریکنواخت محدب و مقعر معرفی و تاثیر آن بر عملکرد لیزر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که توری مقعر باعث بهبود فاکتور یکنواختی، F، و توری محدب کمیت SMSR را افزایش می دهد. در ساختارهای PGC-DFB پارامتر یکنواختی در بعضی شرایط به کمتر از  $10^{-4}$  نیز می رسد.

در بخشی از پایان نامه به منظور دستیابی به عملکرد کاملا تک مد و پایداری بیشتر، اثر انتقال فاز در ساختار توری، بر روی ساختارهای CGC-DFB نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در محاسبات وابستگی ضریب کوپلینگ به جریان تزریقی، که در اغلب مقالات بدلیل پیچیده گی محاسبات از آن صرف نظر می شود، در نظر گرفته شده است.

آنالیز انجام شده در این پایان نامه بر مبنای حل همزمان معادلات موج کوپل شده و معادلات نرخ و با استفاده از روش ماتریس انتقال صورت گرفته است. سعی شده است مشخصات ساختارهای مورد مطالعه حتی الامکان با مشخصات ساختارهای تجربی و کاربردی قابل مقایسه باشند.

# فهرست مطالب

## فصل اول: مقدمه

۱	(۱-۱) مقدمه
---	-------------

## فصل دوم: مبانی لیزرهای نیمرسانا

۸	۱-۲) ماده فعال و دمش
۸	۲-۲) کاواک تشدیدگر
۸	۱-۲-۲) کاواک فابری پرو
۹	۲-۲-۲) کاواک تشدیدگر با آینه یا توری خارجی
۱۰	۳-۲-۲) کاواک تشدیدگر با بازتابنده و توری براگ
۱۱	۴-۲-۲) کاواک تشدیدگر با فیدبک توزیع شده
۱۲	۱-۴-۲-۲) کوپلینگ بهره با توری بهره
۱۳	۲-۴-۲-۲) کوپلینگ بهره با توری جذبی
۱۳	۳-۲) روش‌های مختلف ایجاد توری
۱۶	۴-۲) انتشار موج در لیزرهای DFB
۲۰	۵-۲) توزیع میدان عرضی در موجبر
۲۰	۱-۵-۲) توزیع میدان عرضی در موجبر غیر مختل شده
۲۳	۲-۵-۲) تصحیح توزیع میدان عرضی در موجبر

## فصل سوم: روش آنالیز لیزرهای DFB با کوپلینگ بهره

۲۸	۱-۳) شرایط آستانه
۳۲	۲-۳) ماتریس انتقال
۳۶	۳-۳) ضریب کوپلینگ
۳۶	۱-۳-۳) ضریب کوپلینگ در لیزرهای با یک توری بهره
۳۹	۲-۳-۳) ضریب کوپلینگ در لیزرهای با یک توری اتلافی
۴۰	۳-۳-۳) ضریب کوپلینگ در لیزرهای با دو توری
۴۱	۴-۳) جریان آستانه
۴۲	۵-۳) شرایط بالای آستانه
۴۵	۶-۳) توان خروجی و پهنای خط
۴۶	۷-۳) پدیده‌ی چال سوزی فضایی

- ۴۷ ۸-۳) بازده کوانتومی
- ۴۸ ۹-۳) تایید نتایج حاصل از مدل سازی

## فصل چهارم: ارائه و تحلیل نتایج مدل سازی

- ۵۴ ۱-۴) تحلیل نتایج ساختار CGC-DFB
- ۵۴ ۱-۴-۱) شرایط آستانه
- ۵۴ ۱-۴-۱-۱) ضریب شکست موثر و ضریب تحدید نوری
- ۵۶ ۱-۴-۱-۲) وابستگی ضریب کوپلینگ به مشخصات توری
- ۵۹ ۱-۴-۱-۳) وابستگی چگالی جریان آستانه به مشخصات توری
- ۵۹ ۱-۴-۱-۴) بررسی عملکرد لیزر در شرایط آستانه
- ۶۱ ۱-۴-۱-۵) ارزیابی تک مد بودن لیزر CGC-DFB
- ۶۲ ۱-۴-۱-۶) بررسی پارامتر یکنواختی و پایداری لیزر در مقابل پدیده SHB
- ۶۳ ۱-۴-۱-۷) تأثیر طول کاواک بر مشخصه های لیزر CGC DFB
- ۶۸ ۲-۴-۱) شرایط بالای آستانه
- ۶۸ ۱-۴-۲-۱) وابستگی ضریب کوپلینگ به جریان
- ۷۰ ۲-۴-۱-۲) بررسی پایداری ساختار CGC-DFB در مقابل اثر SHB در شرایط بالای آستانه
- ۷۲ ۲-۴-۱-۳) بررسی طیف گسیل خودبه خود تقویت شده و SMSR در شرایط بالای آستانه
- ۷۵ ۲-۴-۱-۴) توان خروجی
- ۷۶ ۲-۴-۱-۵) پهنای فرکانسی خط طیفی
- ۷۷ ۲-۴-۱-۶) بررسی تغییرات ضریب اتلاف مدی و انحراف از شرط براگ
- ۷۹ ۲-۴) معرفی ساختار CGC-DFB با توری محدب و مقعر
- ۸۰ ۲-۴-۱) تأثیر توری محدب و مقعر روی پارامترهای  $F$  و  $\Delta gL$
- ۸۲ ۲-۴-۲) بررسی ساختار CGC-DFB لیزر با توری محدب و مقعر در شرایط بالای آستانه
- ۸۵ ۲-۴-۳) آنالیز لیزر نیمرسانای GC-DFB با ساختار توری محدب در شرایط آستانه
- ۹۰ ۳-۴) آنالیز رفتار لیزر CGC-DFB با انتقال فاز  $\pi/2$
- ۹۰ ۱-۴-۳-۱) بررسی عملکرد لیزر QWS-CGC-DFB در شرایط آستانه
- ۹۴ ۲-۴-۳-۲) بررسی عملکرد لیزر QWS-CGC-DFB در شرایط بالای آستانه
- ۹۹ ۴-۴) بررسی و تحلیل عملکرد لیزر PGC-DFB
- ۱۰۳ ۱-۴-۴-۱) بررسی عملکرد لیزر PGC-DFB در شرایط آستانه
- ۱۰۶ ۲-۴-۴-۲) بررسی عملکرد لیزر PGC-DFB در شرایط بالای آستانه
- ۱۱۵ ۳-۴-۴-۳) تأثیر بازتاب رویه ها روی عملکرد لیزر PGC-DFB

## فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱۱۶ (۱-۵) نتیجه‌گیری

۱۱۹ (۲-۵) پیشنهادات

۱۲۴

## مراجع

## پیوست: ضریب کوپلینگ در لیزرهای DFB

۱۳۲ روش تعیین ضریب کوپلینگ

۱۳۴ تعیین ضریب کوپلینگ لیزر با شیار دوزنقه‌ای

۱۳۶ ضریب کوپلینگ لیزر با شیار سینوسی

۱۳۸

## واژه نامه

## واژه‌های اختصاری

AR-AR	Anti Reflection- Anti-Reflection
ASE	Amplified Induced emission
ASE	Amplified spontaneous emission
BH	buried Heterostructure
C <sup>3</sup>	Cleaved Coupled Cavity
CGC-DFB	Gain Coupled DFB
CTG	Concave tapered Grating
DBR	Distributed Bragg Reflector
DH	Double- Heterostructure
DFB	Distributed Feedback
EIM	Effective index method
F	Flatness
GC-DFB	Gain Coupled DFB
HR-AR	High Reflection- Anti Reflection
IC-DFB	Index Coupled DFB
LD	Laser Diode
MQW	Multiple Quantum Well
PGC DFB	Pure Gain coupling DFB
PS	Phase shift
QD	Quantum Dot
QWS GC DFB	Quarter Wavelength phase Shift Gain coupling DFB Distributed
QWS IC DFB	Quarter Wavelength phase Shift Index coupling DFB
SCH	Separate Confinement Heterostructure
SH	Single-Heterostructure
SHB	Spatial Hole Burning
SMSR	Side Mode Suppression Ratio
SQW	Single Quantum Well
TE	Transverse Electric
TMM	Transfer matrix method
XTG	Convex tapered Grating

# فصل اول

## مقدمه

ساخت اولین لیزرهای نیمرسانا یا لیزرهای دیودی در اوایل دهه ۶۰ میلادی گزارش شده است [۱ و ۲]. لیزرهای نیمرسانای اولیه که از آلیاژ GaAs ساخته شده بودند به علت جریان آستانه بالا،  $J_{th} \geq 50 \text{ kA/cm}^2$ ، عملاً در دماهای معمولی کاربردی نداشتند. به دنبال تحقیقات در این زمینه و حل مشکل مزبور، ساخت اولین لیزر پیوسته کار در دمای اتاق در سال ۱۹۷۰ گزارش شده است [۳]. لیزرهای نیمرسانا به دلیل مشخصات ویژه مانند اندازه کوچک، بازده بالا و پهنای مدولاسیون وسیع کاربردهای فراوانی دارند. از جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- منابع نوری جهت دمش لیزرهای حالت جامد و تقویت کننده‌ها و لیزرهای فیبرنوری.
- ۲- استفاده وسیع در طیف‌سنجی و تعیین ترازهای فوق ظریف  $^{85}\text{Rb}$  در تعیین استاندارد زمانی
- ۳- انباره‌های نوری و ذخیره داده‌ها
- ۴- روبشگرهای لیزری
- ۵- چاپگرهای لیزری
- ۶- تعیین فاصله
- ۷- ارتباطات نوری

مهمترین کاربرد لیزرهای دیودی استفاده آنها در شبکه مخابرات فیبر نوری بخصوص در سیستم‌های همدوس می‌باشد. در حال حاضر لیزرهای نیمرسانا با فیدبک توزیع شده،<sup>۱</sup> DFB، و لیزرهای بازتابنده براگ،<sup>۲</sup> DBR، مناسبترین چشمه‌های نور در سیستم‌های مخابرات نوری، که اساساً به لیزرهای نیمرسانای تک‌مد نیاز دارند، بشمار می‌رود. در لیزرهای DBR تغییرات تناوبی ضریب شکست یا توری در خارج از ناحیه فعال و در راستای طول کاواک سبب عملکرد تک‌مد لیزر می‌شود. ساختارهای DBR به این دلیل که در قسمتی که توری در آن قرار دارد، دمش وجود ندارد دارای اتلاف نوری بسیار بالایی بوده و همچنین فرایند ساخت آن یک مرحله از فرایند ساخت لیزر DFB بیشتر بوده و علاوه بر این تنظیم طول و فاز توری در محل اتصال به ماده فعال بسیار مهم است. بنابراین این ساختار محبوبیت کمتری نسبت به لیزرهای DFB دارد. با این وجود تحقیقات در مورد این ساختارها ادامه دارد [۴]. در لیزرهای DFB تغییرات تناوبی ضریب شکست و (یا) بهره که در طول کاواک لیزر و در مرز بین لایه-

<sup>1</sup> Distributed Feedback

<sup>2</sup> Distributed Bragg Reflector



های مختلف ایجاد می‌شود سبب کوپلینگ امواج رفت و برگشت شده و نقش فیدبک موج نوری را بطور توزیع شده بعهدده دارند. این تغییرات تناوبی همانند توری پراش باعث تقویت موج در طول موجهای خاص و در نتیجه عملکرد گزینش فرکانسی در لیزر می‌شود. لیزرهای نیمرسانای DFB معمولی که در آنها تغییرات تناوبی ضریب شکست در مرز لایه<sup>۱</sup> موجبر و لایه<sup>۱</sup> پوششی ایجاد شده، در صورتیکه ضرایب بازتاب دو وجه انتهایی لیزر صفر باشد تک مد نیستند و همزمان در دو مد متقارن نسبت به مد براگ توری نوسان می‌کنند [۵]. برای رفع تبهگنی و تک مد کردن این نوع لیزرها، که به آنها لیزر DFB با کوپلینگ ضریب شکست و یا به اختصار IC-DFB<sup>۱</sup> گفته می‌شود، از روشهای متعددی مانند وجوه بازتابنده [۶]، انتقال فاز معادل  $\lambda/4$  در توری [۷] و ایجاد غیریکنواختی در دامنه و دوره تناوب توری در لیزر استفاده می‌کنند [۸]. وجوه بازتابنده انتهای کاواک هرچند مشکل تبهگنی را حل می‌کند اما به دلیل نامشخص بودن فاز توری در وجوه انتهایی، که در هنگام برش قطعه ایجاد می‌شود، و حساسیت زیاد لیزر به ضریب بازتاب مشکلاتی را در عملکرد لیزر ایجاد می‌نماید [۶]. بنابراین ساختارهای QWS IC-DFB مورد استفاده قرار گرفت. مهمترین مشکل در لیزرهای IC-DFB اثر چاله‌سوزی فضایی، SHB<sup>۲</sup>، است که با ایجاد انتقال فاز در توری تقویت شده و سبب ناپایداری لیزر در شرایط بالای آستانه و عملکرد چند مد لیزر می‌شود [۹].

اگر تغییرات تناوبی در مرز مشترک لایه<sup>۱</sup> فعال و موجبر ایجاد شود علاوه بر تغییرات تناوبی ضریب شکست، تغییرات تناوبی بهره نیز در طول کاواک بوجود می‌آید. عملکرد تئوری ساختارهای با کوپلینگ بهره که به آن به اختصار لیزرهای CGC-DFB<sup>۳</sup> و یا GC-DFB<sup>۴</sup>، گفته میشود اولین بار توسط کوگلیک و شانک در سال ۱۹۷۲ همرا با توضیح تئوری ساختارهای IC-DFB گزارش داده شد [۵] و ساخت اولین لیزرهای GC-DFB در سال ۱۹۷۳ گزارش شد [۱۰ و ۱۱]. بررسی تئوری کوگلیک نشان داد که در ساختارهای با کوپل شدگی بهره خالص و لایه نشانی AR-AR در تمامی شرایط دقیقاً در فرکانس براگ نوسان می‌کنند همچنین در مورد این ساختارها، لایه نشانی AR<sup>۵</sup> الزامی نیست [۵].

با معرفی و ساخت لیزرهای CGC-DFB این ساختارها به دلیل حساسیت اندک به بازتاب رویه‌ها و فاز توری و همچنین پایداری بیشتر در مقابل اثر SHB بسیار مورد توجه قرار گرفتند. کمیت SMSR که ملاک تک‌مد بودن لیزر است در لیزرهای GC-DFB یا CGC-DFB دارای مقدار بالایی است [۱۲ و ۱۳]. بررسی دینامیک لیزرهای با کوپلینگ بهره مختلط در شرایط بالای آستانه پایداری این ساختار را نشان می‌دهد [۱۴ و ۱۵]. محاسبات تئوری نشان می‌دهد که اختلاف بهره آستانه مد اصلی و مد کناری در لیزرهای با کوپلینگ بهره خالص، PGC-DFB<sup>۶</sup>، نسبت به سایر ساختارها بسیار قابل ملاحظه است [۱۶].

<sup>1</sup> Index Coupled DFB

<sup>2</sup> Spatial Hole Burning

<sup>3</sup> Complex Gain Coupled DFB

<sup>4</sup> Gain Coupled DFB

<sup>5</sup> Anti-Reflection

<sup>6</sup> Pure Gain Coupled-DFB

ساختارهای GC-DFB در مقابل پدیده امواج ایستاده داخلی پایداری بیشتر و حساسیت کمتری نسبت به بازتابهای نوری خارجی دارند [۱۷ و ۱۸].

در برخی مقالات عملکرد لیزرهای IC-DFB و ساختارهای مختلف GC-DFB بطور جامع با یکدیگر مقایسه شده است [۱۴ و ۱۹]. اثرات چاه کوانتومی روی لیزر GC-DFB در مقالات متعدد بطور تجربی و تئوری گزارش شده است [۲۰ و ۲۱]. طراحی، ساخت و کوک‌پذیری لیزرهای با کوپلینگ بهره در مرجع [۲۲] با توری نمونه بررسی شده است. بطور تجربی نشان داده شده است که یک لیزر CGC-DFB با توری‌ای از جنس SiO<sub>2</sub> با ناحیه فعال چاه کوانتومی علاوه بر عملکرد تک مد دارای SMSR بزرگتر 47dB می‌باشد [۲۳].

علیرغم پیچیدگی‌ها و مشکلاتی که در ساخت ساختارهای CGC-DFB وجود دارد و یا آسیب‌هایی که در هنگام ساخت قطعه و ایجاد توری به ناحیه فعال لیزر وارد می‌شود، به دلیل امتیازاتی که این ساختارها نسبت به ساختارهای با کوپلینگ ضریب شکست دارند بسیار مورد توجه می‌باشند.

هدف این پایان‌نامه مدلسازی و آنالیز تئوری لیزر DFB با کوپلینگ بهره می‌باشد. ساختار مورد نظر یک ساختار پنج لایه از آلیاژ InGaAsP/InP است که طول موج متناظر با گاف نوار ماده فعال آن برابر با ۱/۵۵ میکرومتر است. در ساختارهای با کوپلینگ بهره مختلط، CGC-DFB، که شیارهای توری در مرز مشترک لایه فعال و موجبر ایجاد می‌شود، تغییرات تناوبی ضریب شکست و بهره در طول کاواک بوجود آمده و ضریب کوپلینگ که مشخصه مهم لیزرهای DFB می‌باشد و میزان کوپلینگ امواج رفت و برگشت در ناحیه فعال لیزر را مشخص می‌کند، یک کمیت مختلط است. در ساختارهای با کوپلینگ بهره خالص، PGC-DFB، همزمان دو توری پراش در مرز مشترک لایه فعال - موجبر و موجبر-لایه پوششی ایجاد شده و در شرایط خاصی و اختلاف فاز  $\pi$  رادیان بین دو توری، ضریب کوپلینگ ساختار یک کمیت موهومی، خواهد شد.

قابل ذکر است که در ساختارهای CGC-DFB در نتیجه تغییرات تناوبی بهره و وابستگی بهره به چگالی حامل و به دنبال آن تغییرات ضریب شکست، ضریب کوپلینگ لیزر در شرایط بالای آستانه ثابت نیست. تغییرات ضریب کوپلینگ می‌تواند سبب تغییر پارامترهای دیگر لیزر با افزایش جریان الکتریکی اعمالی شود. با توجه به اطلاعات نویسنده تا کنون در هیچ‌یک از گزارشات ارائه شده در مورد این ساختار، تغییرات ضریب کوپلینگ با جریان روی عملکرد این لیزرها در نظر گرفته نشده است. لذا علیرغم پیچیده و طولانی‌تر شدن محاسبات، تغییرات مذکور در مدلسازی لحاظ شده است. همچنین در این پایان‌نامه برای اولین بار ساختارهای CGC-DFB با توری محدب و مقعر پیشنهاد و عملکرد این لیزر در شرایط آستانه و بالای آستانه مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل دوم پایان‌نامه مبانی فیزیکی لیزر DFB ارائه و معادلات انتشار موج در لیزر بیان شده است. فصل سوم به روش حل و الگوریتم محاسبات عددی اختصاص داده شده است. مدل‌سازی براساس حل همزمان معادلات موج کوپل‌شده و معادله نرخ حامل‌های الکتریکی و با روش ماتریس انتقال انجام

گرفته است. همانطور که ذکر شد در این پایان نامه، در مدلسازی لیزر در شرایط بالای آستانه، تغییرات ضرایب کوپلینگ ناشی از تغییرات ضریب شکست لایه فعال و بهره در نظر گرفته شده است این تغییرات در واقع به دلیل تغییرات چگالی حاملها با افزایش جریان ایجاد می شود. در کارهای تئوری گزارش شده از تغییرات مذکور به دلیل پیچیدگی محاسبات صرف نظر شده است. مسئله دیگری که محاسبات را در این ساختارها پیچیده تر می کند تغییرات طولی چگالی حاملها و فوتونهاست که علاوه بر تغییرات ضرایب کوپلینگ در طول کاواک، در جریانهای بالا منجر به پدیده SHB می شود. در این فصل پارامترهای مهم لیزر از جمله ضریب کوپلینگ، بهره آستانه مدی، انحراف از شرط براگ و پارامتر یکنواختی معرفی شده است. به منظور تایید برنامه کامپیوتری نوشته شده و الگوریتم بکار رفته، چند نتیجه بدست آمده از برنامهها با نتایج کارهای دیگران نیز مقایسه شده است.

در فصل چهارم به نتایج حاصل از محاسبات عددی پرداخته شده است. هدف این فصل نشان دادن وابستگی ضریب کوپلینگ لیزر به مشخصات توری و تحلیل نتایج و عملکرد لیزر در شرایط آستانه و بالای آستانه می باشد. در این فصل برای اولین بار، توریهای محدب و مقعر در ساختارهای CGC<sup>1</sup> DFB بکار رفته و تاثیر آنها روی عملکرد لیزر مورد ارزیابی قرار گرفته است. در اغلب بررسیهای انجام شده، سعی شده است بهینه سازی بر حسب مشخصات ساختار نیز صورت گیرد. نقطه قوت مدلسازی انتخاب مشخصه های ساختاری مناسب و مطابقت نتایج بدست آمده با مقادیر تجربی می باشد. در فصل پنجم نیز جمع بندی انجام شده و پیشنهاداتی جهت ادامه کار ارائه شده است.

<sup>1</sup> Complex Gain coupling Distributed FeedBack

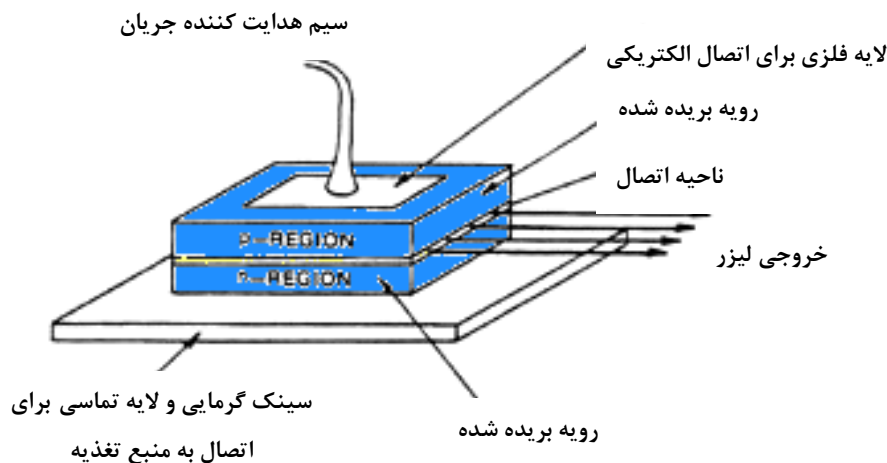
# فصل دوم

## مبانی لیزرهای نیمرسانا

لیزرهای نیمرسانا که لیزرهای دوقطبی LD<sup>۱</sup> و لیزرهای پیوندی<sup>۲</sup> نیز خوانده می‌شوند، با وجود ساختار باندی به جای ساختار تراز، در مفاهیمی چون گسیل القایی<sup>۳</sup>، گسیل خودبخود<sup>۴</sup>، جذب القایی<sup>۵</sup> و وارونی جمعیت<sup>۶</sup> با سایر لیزرها تفاوتی ندارند و آنچه باعث وجه تمایز لیزرها می‌شود، مفاهیمی چون ماده فعال، دمش و فیدبک است که بطور خاص و جداگانه در مورد هر لیزری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

لیزرهای نیمرسانای اولیه از اتصال دو نیمرسانای نوع P و N ساخته شده بودند و فرایند گسیل القایی در ناحیه اتصال دو نیمرسانا رخ می‌داد. در شکل (۱-۱) طرح ساده‌ای از یک لیزر نیمرسانای اولیه نشان داده شده است. با تزریق جریان الکتریکی در یک بایاس مستقیم، ترکیب الکترون و حفره و در نهایت گسیل القایی در لایه وسط رخ داده و گسیل نور از لبه لیزر بوجود می‌آید.

مانند سایر لیزرها، سه مبحث مهم در لیزرهای نیمرسانا مورد توجه قرار دارد. این سه مبحث عبارتند از: ماده فعال لیزری، شیوه دمش و کاواک تشدیدگر، که در مورد هریک از آنها به اختصار توضیح داده می‌شود.



شکل ۱-۲) طرح ساده‌ای از لیزر نیمرسانا

- 1 Laser Diode
- 2 Junction Laser
- 3 Stimulated Emission
- 4 Spontaneous Emission
- 5 Induced Absorption
- 6 Population Inversion

## ۲-۱) ماده فعال و دمش

اغلب لیزرهای دیودی از ترکیب مواد نیمرسانای گروه ۳ مثل Al, Ga, In و عناصر گروه ۵ مثل P, As ساخته می‌شوند. طول موج حاصل از این مواد در بازه  $0.5-1.6 \mu\text{m}$  قرار دارد. مواد دیگری که در ایجاد لیزرهای دیودی به کار می‌روند، شامل ترکیبات عناصر گروه ۲ و ۶ مثل Zn, Pb, Se, Te, Cd, Hg هستند که برای تولید طول موج های مربوط به ناحیه فرورسرخ در بازه  $1.0-2.0 \mu\text{m}$  به کار می‌روند.

در بررسی مواد نیمرسانا به جای استفاده از ترازهای اتمی یا مولکولی یا ارتعاشی که در سایر لیزرها متداول است، از نوارهای هدایت و ظرفیت استفاده می‌شود. مطلب فوق را می‌توان به این صورت توجیه نمود که وقتی فاصله بین اتم‌ها زیاد است، انرژی الکترون‌ها گسسته است (مثلا در گازها) و ترازهای الکترونی شکل می‌گیرد. با کاهش فاصله بین اتم‌ها، تابع موج الکترون‌ها با هم همپوشانی کرده و ترازهای الکترونی شکافته می‌شوند تا اصل طرد پائولی نیز برآورده شود. با افزودن تعداد اتم‌های همسایه، ترازهای انرژی به تعداد بیشتری شکافته شده و فاصله ترازهای انرژی کمتر می‌شود تعداد اتم‌ها، در بلور نیمرسانا در هر سانتیمتر مکعب از مرتبه  $10^{22}$  است. در این شرایط فاصله بین ترازهای انرژی شکافته شده از مرتبه  $10^{-8} \text{eV}$  است درحالی‌که انرژی گاف نوار<sup>۱</sup> از مرتبه الکترون-ولت است. بنابراین در این ساختارها، مجموعه ترازهای الکترونی که باند انرژی نامیده می‌شوند و با توجه به اختلاف کم می‌توان آنها را با تقریب خوبی پیوسته در نظر گرفت، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۴].

دمش لیزر نیمرسانا معمولا به روش الکتریکی و بایاس مستقیم انجام می‌شود که دلیل انتخاب بایاس مستقیم برای ایجاد وارونی جمعیت در ساختار پایه‌ی لیزر نیمرسانا که همان اتصال P-N می‌باشد، نهفته است. در این لیزرهای نیمرسانا بمنظور افزایش وارونی جمعیت، ماده فعال دارای باند انرژی کوچکتری در مقایسه با مواد اطرافش می‌باشد.

## ۲-۲) کاواک تشدیدگر

یک وجه تمایز لیزرهای نیمرسانا مربوط به فیدبک آنها می‌باشد در واقع آنها را می‌توان برحسب ساختار تامین-کننده فیدبک به چند گروه عمده تقسیم نمود که عبارتند از:

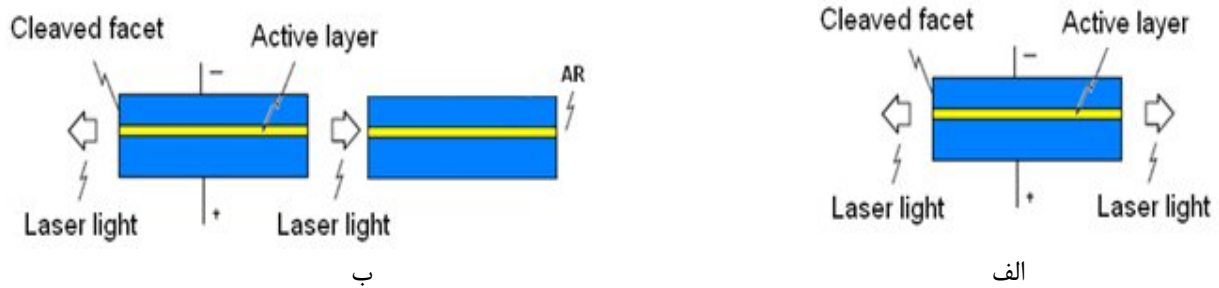
### ۲-۲-۱) کاواک فابری پرو

این تشدیدگرها، بطور وسیعی در لیزرهای جامد و گازی و لیزرهای رنگ<sup>۲</sup> و همچنین لیزرهای نیمرسانا به کار می‌روند. در شکل (۲-۲-الف)، یک کاواک فابری پرو نشان داده شده است. این ساختارها معمولا مولتی مد هستند. در لیزرهای نیمرسانا به منظور دستیابی به عملکرد تک‌مد، ترکیب خاصی از کاواک‌های فابری پرو به نام کاواک

<sup>1</sup> Band gap

<sup>2</sup> Dye

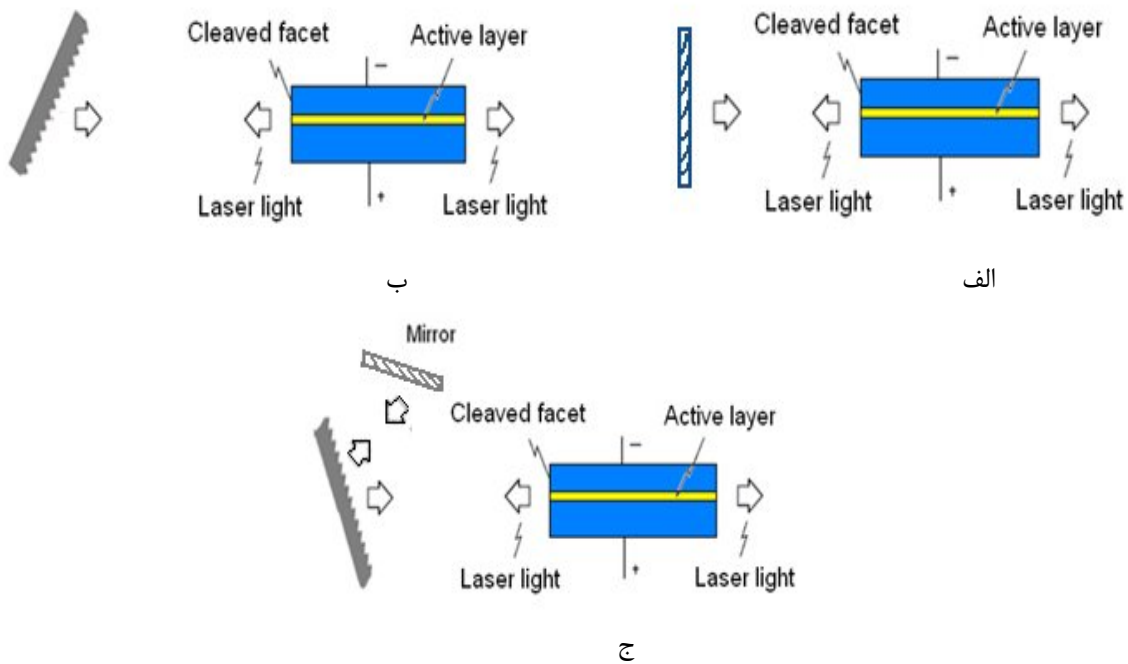
کوپل‌شده<sup>۱</sup> یا  $C^3$  مورد استفاده قرار می‌گیرد. که این کاواک قابلیت ایجاد یک خروجی تک‌مد کوک‌پذیر را دارد. این تشدیدگرها بصورت طرح‌وار در شکل (۲-۲-ب) نشان داده شده‌اند.



شکل (۲-۲) تشدیدگرهای الف: فابری پرو ب:  $C^3$

### ۲-۲-۲) کاواک تشدیدگر با آینه یا توری خارجی

این ترکیب‌ها معمولاً به منظور دستیابی به یک خروجی تک‌مد کوک‌پذیر مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ساختارها به دلیل مشکل تنظیم و سوار نمودن دستگاه مکانیکی زیاد مورد توجه قرار ندارند. علاوه بر این هزینه تولید و بهره‌گیری از این ساختار نیز بسیار زیاد می‌باشد [۲۵]. در شکل (۳-۲) نمونه‌ای از کاواک‌های با آینه و توری خارجی نشان داده شده است.



شکل (۳-۲) کاواک تشدیدگر الف) با آینه خارجی ب) با توری خارجی ج) با آینه و توری خارجی

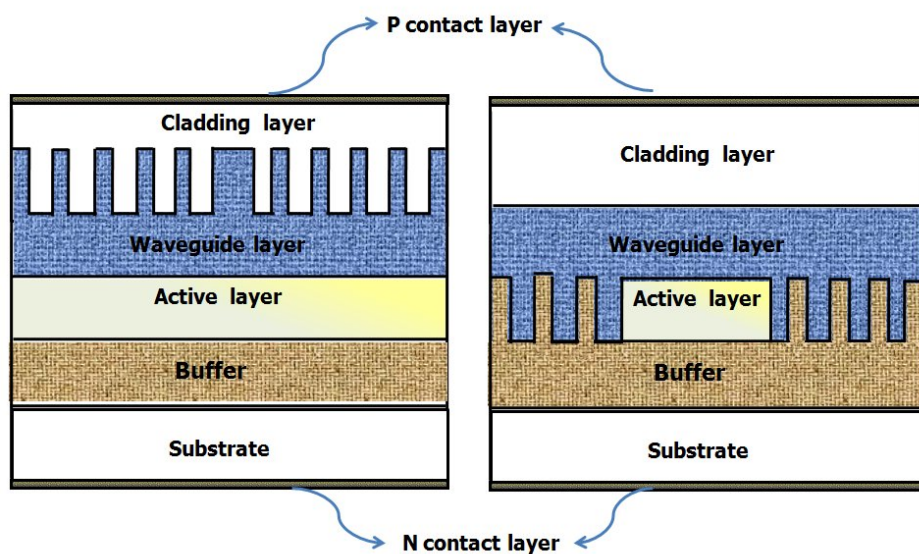
## ۲-۲-۳) کاواک تشدیدگر با بازتابنده و توری براگ

ساختارهای لیزر نیمرسانا که داخل کاواک آنها از توری براگ استفاده می‌نمایند، به دو گروه عمده تقسیم‌بندی می‌شوند، که عبارتند از

۱- لیزرهای با بازتابنده توزیع‌شده (DBR) براگ

۲- لیزرهای با فیدبک توزیع‌شده (DFB)

دو ساختار فوق از ساختارهای مطلوب لیزرهای نیمرسانا هستند با استفاده از این ساختارها می‌توان به عملکرد تک‌مد دست یافت. در شکل (۲-۴-الف)، یک ساختار لیزر نیمرسانای DBR، بطور طرح‌وار نشان داده شده است در انعکاس‌دهنده‌های DBR، ناحیه شیار زده و یا توری در خارج از ناحیه فعال قرار دارد و تنها عاملی که سبب تغییرات تناوبی و کوپلینگ موج رفت و برگشت می‌شود تغییرات تناوبی ضریب شکست می‌باشد. ایراد اینگونه ساختارها در زیاد بودن اتلاف در ناحیه توری می‌باشد.



ب

الف

شکل ۲-۴) طرح‌واره‌ای از ساختار لیزر الف (DBR و ب) IC DFB

نکته جالب توجه این است که با استفاده از انعکاس‌دهنده‌های DBR، امکان تک‌مد نمودن ساختار لیزر نیمرسانا با کاهش طول لیزر نیز ایجاد شده است. در ساختارهای لیزرهای دیودی با تابش‌کننده سطحی با کاواک عمودی<sup>۱</sup> (VCSEL LDS) و با کاواک افقی<sup>۲</sup> (HCSEL LDS)، با کاهش طول و استفاده از تشدیدگرهای DBR، عملکرد تک‌مد ایجاد می‌شود [۲۴]. در این ساختارها طول ناحیه فعال از مرتبه ۱۰ nm تا چند میکرومتر است.

1 Vertical Cavity Surface Emitting LDS

2 Horizontal Cavity Surface Emitting LDS



## ۲-۲-۴) کاواک تشدیدگر با فیدبک توزیع شده

در این ساختار فیدبک لازم برای عمل تقویت تنها به رویه‌های لیزر محدود نمی‌شود، بلکه در طول کاواک توزیع شده است. این امر با استفاده از یک توری حکاکی شده تامین می‌شود. در این ساختارها، ضخامت لایه یا لایه-هایی که در ایجاد ساختار نامتجانس شرکت کرده‌اند، بطور تناوبی در طول کاواک تغییر می‌کند و در نتیجه‌ی تغییر تناوبی گذردهی الکتریکی، موج پیشرو و موج پسرو به یکدیگر کوپل شده و این امر فیدبک لازم برای لیزر را فراهم می‌سازد. در شکل (۲-۴-ب) ساختار لیزر DFB بطور طرح‌وار نشان داده شده است تفاوت این ساختار و ساختار با کاواک DBR در این است که در ساختار لیزر DBR، ناحیه شیارزده و ناحیه بهره نوری از یکدیگر مجزا هستند در حالیکه در مورد لیزرهای DFB ناحیه شیارزده در طول ناحیه بهره‌ی نوری توزیع شده است.

بر طبق اصل براگ، کوپل‌شدگی همدوس بین موج‌هایی که در دو جهت مخالف هم حرکت می‌کنند فقط برای طول موج‌هایی اتفاق می‌افتد که رابطه  $\Lambda = m\lambda_m/2$  را برآورده می‌سازند. در رابطه فوق  $\Lambda$  دوره تناوب توری و  $m$  مرتبه پراش و  $\lambda_m$  طول موج در داخل محیط لیزر می‌باشد. در واقع با انتخاب  $\Lambda$  می‌توان توری‌ای ساخت که فیدبک توزیعی را بگونه‌ای ایجاد نماید که فقط طول موج مورد نظر هدایت شود.

در لیزرهای DFB، کوپلینگ بین امواج رفت و برگشت در لیزر با استفاده از تغییرات تناوبی گذردهی الکتریکی ایجاد شده و بنابراین این تغییرات تناوبی می‌تواند ناشی از تغییرات تناوبی ضریب شکست و یا بهره باشد. بر این اساس لیزرهای DFB به دو گروه عمده تقسیم می‌شوند که عبارتند از:

الف: لیزرهای DFB با کوپلینگ-ضریب شکست<sup>۱</sup> (IC DFB LD)

ب: لیزرهای DFB با کوپلینگ بهره<sup>۲</sup> (GC DFB LD)

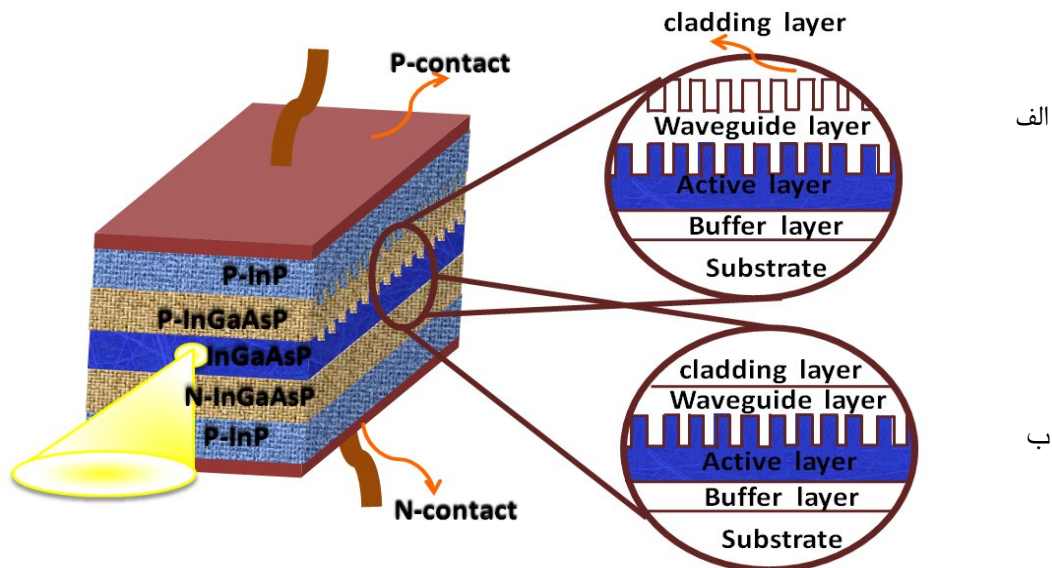
در لیزرهای IC DFB، تغییرات گذردهی الکتریکی ناشی از تغییرات تناوبی ضریب شکست در مرز مشترک دو محیط می‌باشد. در این ساختارها توری در مرز بین لایه موجبر و لایه حفاظتی ایجاد می‌شود. نمونه‌ای از این ساختارها در شکل (۲-۴-ب) نشان داده شده است. در مورد لیزرهای GC DFB، این تغییرات تناوبی، ناشی از تغییرات تناوبی بهره بوده و برای تحقق کوپلینگ بهره روش‌های متعددی وجود دارد که در یکی تغییرات تناوبی بهره و در دیگری تغییرات تناوبی اتلاف برای تحقق کوپلینگ بهره مورد استفاده قرار می‌گیرد.

1 Index coupling

2 Gain coupling

## ۲-۲-۴ (۱-۴-۲-۲) کوپلینگ بهره با توری بهره

در این روش به منظور ایجاد تغییرات تناوبی بهره به شیار زدن لایه فعال مبادرت می‌ورزند. با این روش می‌توان کوپلینگ ترکیبی و یا کوپلینگ خالص را ایجاد نمود. شکل (۲-۵-الف) ساختاری را نشان می‌دهد که در آن دو توری بکار رفته که یکی از آنها در مرز بین موجبر و لایه فعال و دیگری در مرز بین موجبر و لایه حفاظتی قرار دارد در این ساختار، امکان تحقق کوپلینگ بهره‌ی خالص و همچنین مختلط وجود دارد. در صورتیکه که توری‌ها دارای اختلاف فاز  $\pi$  باشند و نیز ارتفاع توری‌ها بگونه‌ای تنظیم شود که سهم کوپلینگ ضریب شکست دو توری حذف شود، کوپلینگ بهره‌ی خالص ایجاد شده و در غیر اینصورت کوپلینگ مختلط وجود دارد.

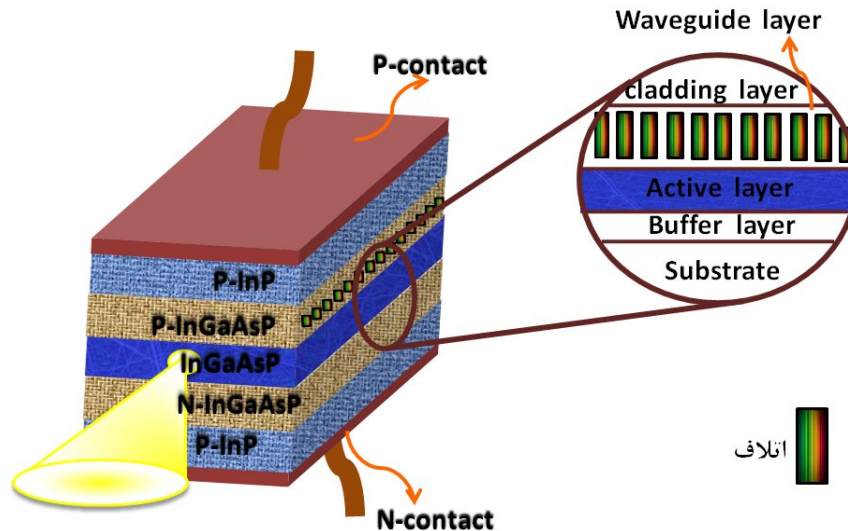


شکل ۲-۵) طرح‌واره‌ای از لیزر DFB با کوپلینگ بهره (الف) با دو توری (ب) با یک توری و کوپلینگ بهره‌ی مختلط

در مورد این ساختارها در شرایط عملکردی با کوپلینگ بهره‌ی خالص، بطور عملی ضریب کوپلینگ تجربی  $40 \text{ cm}^{-1}$  تحقق یافته است [۱۱]. در شکل (۲-۵-ب)، ساختارهای دارای یک توری در مرز مشترک بین لایه‌ی فعال و موجبر نشان داده شده است در این ساختارها، کوپلینگ همزمان بهره و ضریب شکست وجود دارد و با توجه به اینکه فقط یک توری وجود دارد و کوپلینگ بهره و ضریب شکست با استفاده از یک توری ایجاد شده، بنابراین همواره کوپلینگ بهره‌ی مختلط، وجود دارد.

## ۲-۴-۲-۲) کوپلینگ بهره با توری جذبی

در اینگونه ساختارها، کوپلینگ با استفاده از یک توری جذبی تحقق می‌یابد. این ساختارها به دو گروه عمده‌ی لیزرهای با کوپلینگ بهره خالص<sup>۱</sup> و لیزرهای با کوپلینگ بهره مختلط<sup>۲</sup> تقسیم می‌شوند. متداول‌ترین نوع این ساختارها، ساختارهای با کوپلینگ بهره‌ی خالص است که در آن لایه‌ی فعال شیار زده نشده و در داخل ناحیه‌ی موجبر، تغییرات تناوبی اتلاف یا به عبارتی توری اتلافی ایجاد می‌شود. این ساختار بطور طرح‌وار در شکل (۶-۲) نشان داده شده است.



شکل (۶-۲) طرح‌واره‌ای از لیزر DFB با توری اتلافی یا جذبی و کوپلینگ بهره‌ی خالص

## ۲-۳) روش‌های مختلف ایجاد توری

خصوصیات جذاب DFB LDها اصولاً ناشی از حضور یک توری پراش است که در ساختار لیزر ایجاد می‌شود. در یک DFB LD، تغییرات تناوبی ضریب شکست و بهره در امتداد طول باعث می‌شود که میدان الکتریکی‌ای که در راستای  $+z$ ،  $-z$  منتشر می‌شود، به یکدیگر کوپل شوند موجبر با شیارهای تناوبی برای اهداف مختلف به کار می‌رود. در میان این اهداف، کاربرد آنها در موارد زیر بسیار چشمگیر و روزافزون است.

الف: لیزرهای با فیدبک توزیع شده (DFB) [۲۶]

ب: لیزرهای با انعکاس دهنده توزیع شده براگ (DBR) [۲۷]

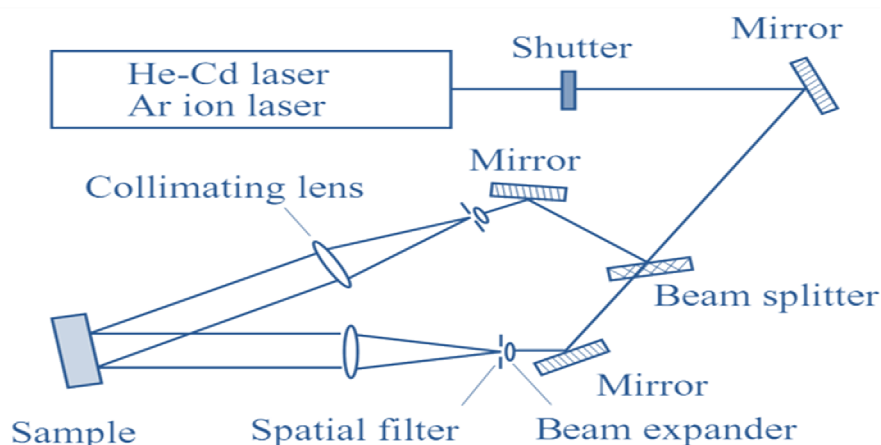
ج: فیلترها [۲۸]

ج: کوپل کننده های ورودی و خروجی<sup>۳</sup> [۲۹]

1 Purely Gain coupling  
2 complex coupling  
3 Input and output couplers

د: تسهیم کننده ها<sup>۱</sup> [۳۰]

بطور کلی طول موج نوسان برای منابع سیستم‌های ارتباطات فیبر نوری  $1/3 \mu\text{m}$  یا  $1/55 \mu\text{m}$  است که در آنها به ترتیب پاشندگی فیبر نوری و اتلاف جذبی فیبر حداقل می‌باشد. با توجه به مطالب فوق و همچنین این مطلب که معمولاً ضریب شکست موثر لیزرهای نیمرسانا تقریباً برابر با  $3/2$  است، دوره تناوب توری برای طول موج خروجی  $1/3 \mu\text{m}$  برابر با  $0/2 \mu\text{m}$  و برای طول موج خروجی  $1/55 \mu\text{m}$  برابر با  $0/24 \mu\text{m}$  است. عمق شیاریها در حدود  $100 \text{nm}$  است که پس از رشد همبافته<sup>۲</sup> بر روی آن و در پایان مراحل ساخت، به چند ده نانومتر کاهش می‌یابد. این کاهش در عمق توری بدلیل تجزیه‌های گرمازا در سطح توری در خلال گرمایش قبل از رشد همبافته صورت می‌گیرد.



شکل ۲-۷) طرح‌واره ایجاد توری با استفاده از روش تابش هولوگرافیک

بمنظور دستیابی و ساخت اینچنین توری‌های با دقت عالی، روش‌های تمام‌نگاری<sup>۳</sup> و تابش باریکه-الکترونی<sup>۴</sup> و تابش اشعه X، گسترش یافتند. در روش تمام‌نگاری، طرح توری با استفاده از طرح تداخلی ناشی از باریکه لیزر همدوس بر روی ماده نور-مقاوم<sup>۵</sup> که بر روی لایه‌ی پایه قرار گرفته، به ساختار منتقل می‌شود. (مواد نور-مقاوم موادی هستند که در اثر اعمال نور سفت و محکم می‌شوند و بنابراین بعنوان ماسک حکاکی در فرایند ایجاد توری بکار می‌روند). در این روش بطور وسیعی از لیزرهای He-Cd ( $\lambda = 532 \text{ nm}, 441/68 \text{ nm}$ ) یا لیزرهای یونی ( $\lambda = 488 \text{ nm}$ ) استفاده می‌شود. شکل (۲-۷)، یک نمونه از سیستم‌های تمام‌نگاری را نشان می‌دهد که در آن یک باریکه لیزر توسط شکافنده باریکه<sup>۶</sup> شکافته شده و بعد از عبور از گسترنده باریکه<sup>۷</sup> پهن شده و سرانجام

1 multiplexers  
2 Epitaxial growth  
3 Holographic Exposure  
4 Electron Beam Exposure  
5 Photoresist  
6 Beam splitter  
7 Beam expander