

# فصل اول

## مقدمه

نخستین لیزرهای تار نوری آلاییده به عناصر خاکی نادر در سال ۱۹۶۱ میلادی ارائه شدند [۱] و [۲]. سپس در سال ۱۹۷۳ تارهای نوری سیلیکایی با اتلاف پایین برای ساخت لیزرهای تار نوری که با لیزرهای دیودی دمش می‌شدند، در دسترس قرار گرفتند. اگرچه فعالیت‌های پژوهشی به طور مستمر ادامه داشت، با این وجود لیزرهای تار نوری در اواخر سال ۱۹۸۰، به طور چشمگیری توسعه یافتند. تأکید اولیه بر روی تارهای نوری آغشته به اربوم و نئودیموم متمرکز بود [۱ و ۲] اما سایر ناخالصی‌ها مانند ساماریوم، تالیوم و ایتربیوم نیز استفاده می‌شدند [۲]. در آغاز سال ۱۹۸۹ میلادی لیزرهای تار نوری آلاییده به اربوم به شدت مورد توجه واقع شدند [۳]، EDFLها از طرح پمپاژ سه ترازه استفاده می‌کنند و با استفاده از لیزرهای نیمه رسانا در طول موج‌های ۹۸۰ و ۱۴۸۰ نانومتر پمپ می‌شوند [۴]. لیزرهای تار نوری آلاییده به یون اربوم می‌توانند در چندین ناحیه طول موج، از نور مرئی تا مادون قرمز عمل کنند اما از آنجایی که ناحیه ۱۵۵۰ نانومتر برای مخابرات نوری ناحیه‌ای با تلفات پایین محسوب می‌شود، بیشترین توجه به این ناحیه عملکردی معطوف شده است.

لیزرهای تار نوری آلاییده به یون عناصر خاکی نادر، به دلیل مزایای فراوان از جمله ابعاد کوچک، وزن سبک، کیفیت خوب باریکه خروجی، بازده و توان بالا جایگزین مناسبی برای لیزرهای حالت جامد و سایر لیزرهای شیشه‌ای، بشمار می‌روند. یکی از پرکاربردترین لیزرهای

تار نوری، لیزر تار نوری آلائیده به یون اربیوم<sup>۱</sup> (EDF) می‌باشد که بطور گسترده در مخابرات نوری، حسگرهای نوری، پزشکی، اسپکتروسکوپی لیزری و بسیاری از ابزارهای اندازه‌گیری استفاده می‌شود. عملکرد تک‌مدی، پهنای خط کم، گسیل در ناحیه ۱۵۵۰ نانومتر و قابلیت کوک‌پذیری در لیزرهای EDF سبب شده که این نوع لیزرها موقعیت ویژه‌ای در تحقیقات و تکنولوژی بدست آورند.

برای افزایش خروجی یک لیزر تار نوری، قطر مغزی باید افزایش یابد در ضمن برای حفظ کیفیت باریکه لیزر بایستی روزنه عددی کاهش یابد که برآوردن همزمان این دو شرط در لیزرهای تار معمولی دارای محدودیت می‌باشد [۴]. بلورهای فوتونی ساختارهایی مصنوعی هستند که گذردهی الکتریکی آنها تابعی متناوب از مکان است و دوره تناوب ساختار در حد طول موج نور می‌باشد [۵]. در بررسی بلورهای فوتونی به نوع جدیدی از تارهای نوری دست می‌یابیم که دارای کاربردهای بالقوه‌ای در زمینه‌های اپتیک غیرخطی، لیزرهای تار نوری<sup>۲</sup> (FL) و مخابرات می‌باشند که این تارها را تارهای بلور فوتونی<sup>۳</sup> می‌نامیم [۱]. در واقع از سال ۱۹۹۱ میلادی ایده باندهای توقف فوتونی در ساختارهای تناوبی برای کنترل انتشار نور در تمامی جهات منجر به یک تلاش جهانی برای ساخت تارهای بلور فوتونی شد [۳]. با استفاده از این نوع تارها تمامی محدودیت‌ها و موانع موجود در تارهای نوری ضریب شکست پله‌ای<sup>۴</sup> (SIF) که عملکرد آنها را در زمینه لیزرها و تقویت کننده‌های تار نوری محدود می‌کند، برداشته می‌شود. تارهای بلور فوتونی در حقیقت مناسب‌ترین تکنولوژی در افزایش قابل توجه توان لیزرهای تار نوری به‌شمار می‌روند. این واقعیت به دلیل انعطاف‌پذیری بالا در افزایش اندازه مغزی تک‌مد، افزایش روزنه عددی، پایداری حرارتی بالای ساختارهای تمام شیشه و اتلاف پایین آنها می-

---

<sup>1</sup> Erbium Doped Fiber

<sup>2</sup> Fiber Lasers

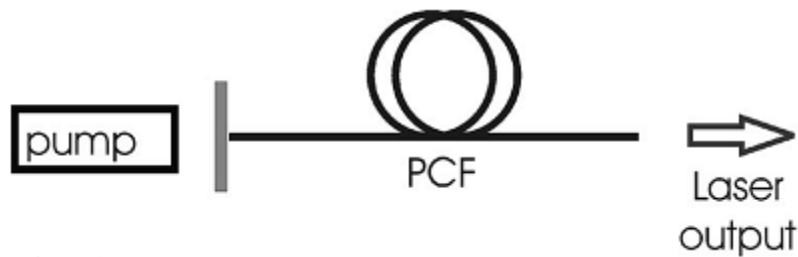
<sup>3</sup> Photonic Crystal Fibers

<sup>4</sup> Step Index Fiber

باشد. یک تار بلور فوتونی آلائیده به عناصر خاکی کمیاب به عنوان ماده فعال لیزر تار بلور فوتونی<sup>۱</sup> (PCF-Laser) مورد استفاده قرار می‌گیرد. تارهای بلور فوتونی آلائیده به عناصر خاکی کمیاب دارای ویژگی‌های منحصر به فردی هستند که اجازه می‌دهد پر قدرت‌تر از لیزرهای تار معمولی ظاهر شوند. جالب توجه‌ترین این ویژگی‌ها عبارت‌اند از: اندازه مغزی بزرگ که می‌تواند باعث کاهش اثرات غیر خطی در مقایسه با لیزرهای تار معمولی شود، وجود ناحیه هوا – غلاف که منجر به روزه عددی بزرگی در این ساختارها می‌شود. منبع پمپ نوری برای کاربردهای پر قدرت به طور معمول در قالب لیزرهای دیودی انرژی ماده فعال را تامین می‌کند. تار بلور فوتونی فعال، پمپ نور را که دارای کیفیت پایینی است به سیگنال نوری با کیفیت بالا تبدیل می‌کند. به کارگیری تارهای بلور فوتونی با اثرات غیرخطی کاهش یافته در دهه اخیر منجر به افزایش قابل توجه سطوح توان لیزر شده‌اند. افزایش بیشتر توان ضرورتاً مستلزم استفاده از تارهایی با ناحیه مد بزرگ و یا تارهایی با طول کوتاه‌تر خواهد بود که هر دو توسط لیزرهای تار بلور فوتونی قابل حصول می‌باشد. تغییر و تحولات اساسی در مورد تارهای نوری ساده از اوایل سال ۱۹۹۰ میلادی شروع شد، اما به طور اساسی شتاب کار به سال‌های پایانی قرن بیستم مربوط می‌شود. در واقع ساخت نخستین لیزر تار بلور فوتونی در سال ۲۰۰۰ میلادی گزارش شد. از آن زمان به بعد روش‌های مختلفی برای استفاده از تارهای بلور فوتونی در لیزرهای تار نوری منتشر شده است. در شکل (۱-۱) یک لیزر تار بلور فوتونی به طور شماتیک نشان داده شده است [۵].

---

<sup>1</sup> Photonic Crystal Fiber-Lasers



شکل (۱-۱) - نمای شماتیک یک لیزر تار بلور فوتونی

خروجی لیزرهای تار بلور فوتونی از آغاز تا سال ۲۰۰۸ میلاد از ۱۰W به ۱/۵۳KW رسید [۶]. در سال ۲۰۰۳ میلادی یک لیزر تار بلور فوتونی با قطر مغزی ۶۰ میکرومتر توسط موسسه Jena ساخته شد. ناحیه مد تار ۲۰۰۰ میکرومتر مربع و بازده شیب ۰.۷۸٪ گزارش شده است [۱]. در مورد لیزرهای تار بلور فوتونی آلاینده به عناصر خاکی کمیاب گزارش‌های متعددی ارائه شده است [۷]، اما در مورد لیزرهای تار بلور فوتونی آلاینده به یون اربوم گزارش‌های اندکی در دسترس می‌باشد. به‌طوریکه در سال ۲۰۰۵ میلادی گزارش ساخت یک لیزر تار بلور فوتونی آلاینده به یون اربوم با آستانه ۵۵ mW، توسط K.Furusawa بدون ذکر اندازه خروجی گزارش شده است [۸]. در سال ۲۰۱۰ میلادی Haili Yang و همکارانش موفق به کسب خروجی به بزرگی ۴/۴۹mW از یک لیزر تار بلور فوتونی آلاینده به یون اربوم به طول ۹/۶m با آستانه ۶/۶۷mW شدند که دارای کیفیت بالای بیم و بازده شیب ۰.۱۵/۸٪ بوده است [۹].

## ۱-۱- ساختار و هدف پایان نامه

هدف این پایان نامه بررسی و تحلیل تئوری لیزرهای تار نوری بلور فوتونی آلاینده به یون اربوم می باشد. مشخصه های ساختاری بلور فوتونی، طول تار نوری و غلظت یونها از پارامترهای مهمی هستند که وابستگی عملکرد لیزر به آنها در این پایان نامه بررسی می شود. در فصل دوم، ابتدا تئوری انتشار نور در تارهای نوری با ضریب شکست پله ای مورد بررسی قرار گرفته و سپس روش ضریب شکست موثر اسکالر<sup>۱</sup> به منظور مدل سازی تارهای بلور فوتونی توضیح داده خواهد شد. در فصل سوم الگوریتم روش عددی رونگ - کوتا که در شبیه سازی لیزر تار نوری بلور فوتونی آلاینده به یون اربوم از آن استفاده می شود ارائه شده است. فصل چهارم به تجزیه و تحلیل نتایج عددی بدست آمده اختصاص یافته است. در فصل پنجم نتیجه گیری و پیشنهادات برای کارهای آینده ارائه شده است.

---

<sup>1</sup> Scalar Effective Index Method

# فصل دوم

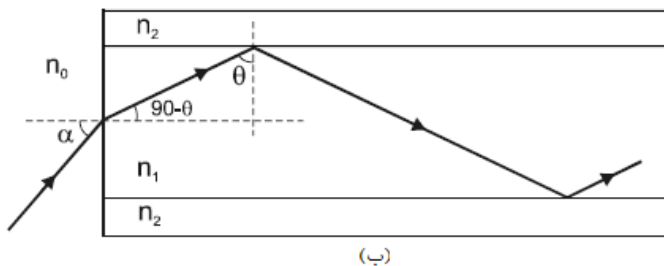
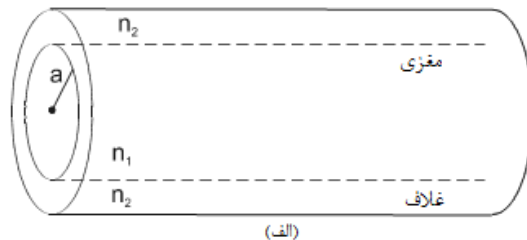
معرفی و مبانی فیزیکی بلورهای فوتونی

و تارهای بلور فوتونی

در این فصل به منظور تحلیل انتشار نور در تارهای بلور فوتونی، ابتدا تئوری انتشار نور در تارهای ضریب شکست پله‌ای مورد بررسی قرار گرفته است، سپس با معرفی بلورهای فوتونی و با استفاده از روش ضریب شکست موثر اسکالر نحوه انتشار نور در تارهای بلور فوتونی ارائه شده است.

## ۱-۲ تئوری انتشار نور در تارهای نوری ضریب شکست پله‌ای

در این بخش معادلات اصلی تئوری انتشار امواج الکترومغناطیسی مربوط به انتشار موج در تارهای نوری ارائه شده است. در شکل (۱-۲-الف) یک تار نوری دی‌الکتریک استوانه‌ای با ضریب شکست پله‌ای و در شکل (۱-۲-ب) مسیر انتشار نور در آن نشان داده شده است.



شکل (۱-۲) - (الف) نمایی از یک تار نوری با ضریب شکست پله‌ای و (ب) مسیر انتشار نور در تار نوری

ضرایب شکست یک تار نوری ضریب شکست پله‌ای به صورت زیر می‌باشد:

$$n = \begin{cases} n_{co} : r \leq a \\ n_{cl} : r > a \end{cases}, n_{co} \geq n_{cl} \quad (1-2)$$

مولفه میدان الکتریکی موج الکترومغناطیس که در یک تار نوری منتشر می‌شود از معادله موج زیر پیروی می‌کند.

$$\nabla^2 E = \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (2-2)$$

که در آن  $n$  ضریب شکست محیط و  $c$  سرعت نور در فضای آزاد است. در تار نوری استوانه‌ای میدان  $E$  تابعی از مختصات  $r$ ،  $\varphi$  و  $Z$  می‌باشد. برای معادله (۲-۲) پاسخی بصورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$E = E_0 R(r) \Phi(\varphi) e^{-i\beta z} e^{i\omega t} \quad (3-2)$$

که در آن  $E_0$  دامنه ثابت میدان،  $\omega$  فرکانس موج و  $\beta$  ثابت انتشار موج در امتداد محور  $Z$  است. با استفاده از رابطه لاپلاسین در مختصات استوانه‌ای و قرار دادن پاسخ (۳-۲) در معادله موج اسکالر (۲-۲) و اندکی عملیات ریاضی معادله زیر بدست می‌آید.

$$-\frac{1}{\Phi} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \Phi = \frac{1}{R} \left( r^2 \frac{\partial^2}{\partial r^2} R + r \frac{\partial}{\partial r} R + r^2 (k^2 - \beta^2) R \right) \quad (4-2)$$

که در آن  $k$  ثابت انتشار موج در محیط تار نوری است. معادله (۴-۲) را می‌توان بصورت دو معادله مستقل زیر نوشت.

$$\frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \Phi + m^2 \Phi = 0 \quad (2-5-الف)$$



$$r^2 \frac{\partial^2}{\partial r^2} R + r \frac{\partial}{\partial r} R + (K^2 - m^2) R = 0 \quad (2-5-ب)$$

که در آن ثابت  $m$  به دلیل شرط  $\phi(\varphi+2\pi)=\phi(\varphi)$  عدد صحیحی است و  $k^2 - \beta^2 = K^2$ ، می‌باشد. پاسخ معادله (2-5-الف) به شکل  $\Phi(\phi)=\Phi_0 e^{im\phi}$  بوده و معادله (2-5-ب) معادله دیفرانسیل بسل است و برای مقادیر صحیح  $m$ ، در نواحی مغزی و غلاف به ترتیب دارای پاسخ‌های زیر می‌باشد:

$$y = c_1 J_m(kx) + c_2 N_m(kx) \quad , \quad k^2 x^2 \geq 0 : \quad \text{ناحیه مغزی} \quad (2-6-الف)$$

$$y = c_3 I_m(kx) + c_4 K_m(kx) \quad , \quad k^2 x^2 < 0 : \quad \text{ناحیه غلاف} \quad (2-6-ب)$$

در توابع فوق،  $J_m(kx)$ ،  $N_m(kx)$ ،  $I_m(kx)$  و  $K_m(kx)$  به ترتیب توابع بسل نوع اول، نوع دوم، اصلاح شده نوع اول و اصلاح شده نوع دوم مرتبه  $m$  ام می‌باشند. ثابت‌های  $c_1$  تا  $c_4$  با اعمال شرایط مرزی تابع موج و مشتقش در مرز مغزی-غلاف،  $r=a$  به دست می‌آیند. به دلایل فیزیکی انتظار داریم که توزیع میدان در تار نوری دارای تکینگی نباشد. این بدان معناست که چون  $N_m$  و  $I_m$  به ترتیب در مغزی و غلاف واگرا می‌شوند بنابراین باید ضرایب  $c_2=c_3=0$  باشد. برای جلوگیری از میرا شدن نور در ناحیه مغزی باید  $Kr$  در مغزی، حقیقی و در غلاف، موهومی باشد بعبارتی لازم است که در ناحیه مغزی،  $(Kr)^2 \geq 0$  یا  $(k_{co}^2 - \beta^2)r^2 \geq 0$  نگه داشته شود. در مقابل در ناحیه غلاف باید  $(Kr)^2 \leq 0$  و یا  $(k_{cl}^2 - \beta^2)r^2 \leq 0$  باشد. بطور کلی برای انتشار نور در یک تار نوری باید شرط زیر برقرار باشد.

$$k_{co} \geq \beta \geq k_{cl} \quad (2-7)$$

که در آن:

$$\begin{cases} k_{co}^2 = K_{co}^2 - \beta^2 \\ k_{cl}^2 = -(K_{cl}^2 - \beta^2) \end{cases} \quad (۸-۲)$$

کمیت‌های بدون بعد  $u$  و  $w$  را به شکل زیر تعریف می‌کنیم.

$$\begin{cases} u = k_{co}a \\ w = k_{cl}a \end{cases} \quad (۹-۲)$$

که با توجه به روابط (۸-۲) و (۹-۲)، رابطه زیر به دست می‌آید.

$$u^2 + w^2 = (K_{co}^2 - K_{cl}^2)a^2 = k_0^2(n_{co}^2 - n_{cl}^2)a^2 \quad (۱۰-۲)$$

بنابراین عبارت  $u^2 + w^2$  برابر با مقدار ثابتی است که آن را فرکانس نرمالیزه نامیده و معمولاً با حرف  $V$  نشان می‌دهند.

$$\begin{aligned} V &= k_0 a N A \\ &= \frac{2\pi}{\lambda_0} a (n_{co}^2 - n_{cl}^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (۱۱-۲)$$

پارامتر  $V$ ، تعداد مدهای هدایت شده در تار نوری را مشخص می‌کند و برای داشتن یک تار نوری تک مد، این پارامتر باید شرط  $V < ۲/۴۰۵$  را حفظ نماید [۱۰]. در رابطه (۱۱-۲)،  $NA$  به عنوان روزنه عددی تار نوری معرفی می‌شود که در سیستم‌های نوری برای تعیین ماکزیمم زاویه پذیرش نور ورودی به سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از پارامترهای  $u$  و  $w$ ، حل عمومی معادله موج برای یک تار نوری با ضریب شکست پله‌ای را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$\begin{cases} N_{co} = c_{co} J_m \left( \frac{ur}{a} \right) \cos(m\phi + \phi_0): & r \leq a \\ N_{cl} = c_{cl} K_m \left( \frac{wr}{a} \right) \cos(m\phi + \phi_0): & r > a \end{cases} \quad (۱۲-۲)$$

با اعمال شرط پیوستگی توابع فوق و مشتقاتشان در  $r = a$

$$c_{co} J_m(u) = c_{cl} N_m(w) \quad (۱۳-۲ \text{ الف})$$

$$c_{co} \frac{\partial}{\partial r} J_m \left( \frac{ur}{a} \right) \Big|_{r=a} = c_{cl} \frac{\partial}{\partial r} K_m \left( \frac{wr}{a} \right) \Big|_{r=a} \quad (۱۳-۲ \text{ ب})$$

و با استفاده از روابط بازگشتی

$$\begin{cases} uJ'_m(u) = mJ_m(u) - uJ_{m+1}(u) \\ wK'_m(w) = mK_m(w) - wK_{m+1}(w) \end{cases} \quad (۱۴-۲)$$

معادله ویژه مقداری زیر برای تارهای نوری با ضریب شکست پله‌ای به دست می‌آید.

$$\frac{J_m(u)}{uJ_{m+1}(u)} = \frac{K_m(w)}{wK_{m+1}(w)} \quad (۱۵-۲)$$

با استفاده از رابطه (۱۵-۲) حل‌های مجاز برای مد اصلی به ازاء  $m = 0$  به صورت می‌باشد.

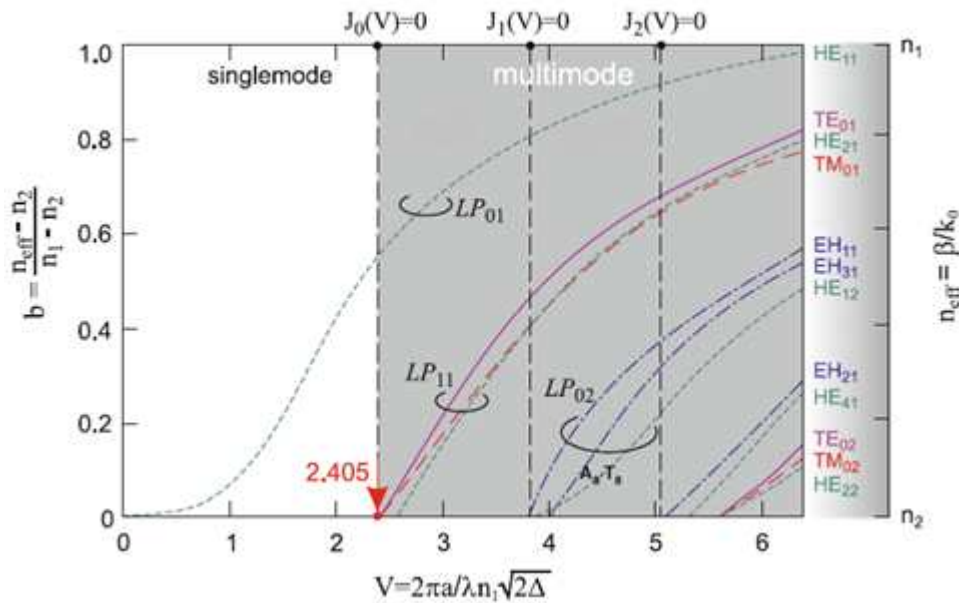
$$\frac{J_0(u)}{uJ_1(u)} = \frac{K_0(w)}{wK_1(w)} \quad (۱۶-۲)$$

در یک تار نوری دیاگرام  $bV$  معرف تعداد مدهای هدایت شده توسط تار می‌باشد، که در آن  $b$  ثابت انتشار نرمالیزه بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۱].

$$b = \frac{\beta/k_0 - n_2}{n_1 - n_2} = \frac{\bar{n} - n_2}{n_1 - n_2}, \quad n_{eff} = \bar{n} = \frac{\beta}{k_0} \quad (۱۷-۲)$$

در شکل (۲-۲)، نمودار  $b$  بر حسب پارامتر  $V$  برای تعدادی از پایین‌ترین مرتبه‌های مدی که در تار نوری منتشر می‌شود نشان داده شده است [۱۲]. مدهای TE و TM به ترتیب مدهای

الکتریکی و مغناطیسی عرضی هستند. مدهای EH و HE مدهای ترکیبی هستند و شامل هر دو مولفه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در طول محور تار می‌باشند.

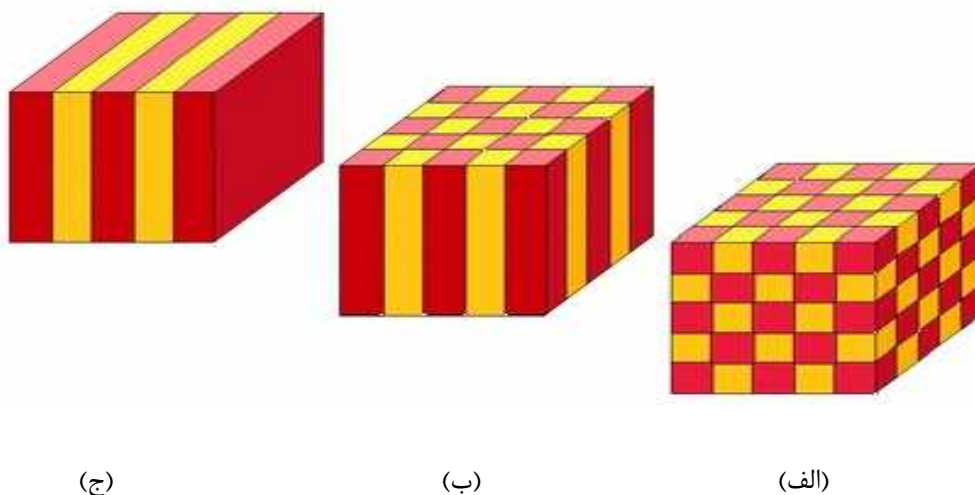


شکل (۲-۲) - تغییرات ثابت انتشار نرمالیزه،  $b$  بر حسب پارامتر  $V$  برای تعدادی از پایین‌ترین مرتبه مرتبه‌های مدی که در تار نوری منتشر می‌شود. سمت راست نمودار، نشان‌دهنده ضریب شکست مد می‌باشد.

از آنجایی که تک مد نگه داشتن تار نوری بویژه در مخابرات نوری بسیار حائز اهمیت است و تارهای نوری ضریب شکست پله‌ای در این زمینه دارای محدودیت‌ها و مشکلاتی می‌باشند، لذا اگر بتوانیم محیطی را بوجود آوریم که در آن فوتون‌های دارای انرژی خاص اجازه عبور از ساختار نداشته باشد قادر به مدیریت رفتار فوتون‌های ساختار خواهیم بود، این خواسته‌ها توسط ساختارهایی مصنوعی به نام بلورهای فوتونی قابل حصول می‌باشد.

## ۲-۲- بلورهای فوتونی

بلورهای فوتونی، نوع جدیدی از رساناهای نوری هستند که توسط ساختارهای طبیعی یا مصنوعی و با بطور تناوبی قرار گرفتن ضرایب شکست مختلف کنارهم نمایش دادن می‌شوند. از لحاظ هندسه ساختار،  $PC^1$  ها را می‌توان به سه گروه عمده تقسیم کرد که به صورت ساختارهای یک بعدی ( $1D$ )، دو بعدی ( $2D$ ) و سه بعدی ( $3D$ ) نام‌گذاری می‌شوند. در شکل (۲-۲)، نمونه ای از این ساختارها نشان داده شده است [۲].



شکل (۲-۲) - طرح ساده‌ای از بلورهای فوتونی (الف) سه بعدی، (ب) دوبعدی و (ج) سه بعدی

علی‌رغم اینکه بلورهای فوتونی تنها در طی چند دهه اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند، اما نخستین فرضیات امکان کنترل انتشار نور با استفاده از ساختارهای تناوبی به سال ۱۸۸۷ میلادی برمی‌گردد که در آن لرد رالی<sup>۲</sup> به این حقیقت پی برد که این ساختارهای تناوبی دارای شکاف نوار باریکی هستند که از عبور نور از میان صفحات ممانعت می‌کند. تقریباً یک

<sup>1</sup>Photonic Crystal

<sup>2</sup> Lord Rally

صد سال بعد یعنی در سال ۱۹۷۲، بیکن<sup>۱</sup> مقاله‌ای منتشر کرد که در آن امکان استفاده از ساختارهای تناوبی برای کنترل گسیل خود به خودی نور را توصیف می‌کرد. با این حال نخستین پیشرفت‌ها در مورد PC مربوط به کار یابلونویچ<sup>۲</sup> و جان<sup>۳</sup> بود که در سال ۱۹۸۷ انتشار یافت. در این مقاله ساختار سه بعدی پیشنهاد شده بود که قادر بود به طور کامل از گسیل خود به خودی نور جلوگیری کند. نخستین ساختار موفقیت آمیز سیلیکا - هوا در سال ۱۹۹۵ به دست آمد و در آن ۲۱۷ عدد لوله موئی به صورت هشت لایه بیرونی حول لوله موئی مرکزی در سیلیکا جاسازی شده بود. در واقع در همین سال بود که طی یک مقاله نشان داده شد که ساختارهای دو بعدی سیلیکا - هوا دارای باند توقف فوتونی هستند. در سال ۲۰۰۰ میلادی نخستین بلور فوتونی سه بعدی که حاوی باند توقف کامل بود، نزدیک به ناحیه فروسرخ به دست آمد [۱۳].

## ۲-۱-۲- بلورهای فوتونی یک بعدی

در یک PC یک بعدی، مدولاسیون گذردهی الکتریکی ( $\epsilon$ )، تنها در یک جهت صورت می‌گیرد در حالی که در دو جهت دیگر، ساختار همگن است. مثالی از این نوع بلور فوتونی توری-های براگ می‌باشند که به طور گسترده به عنوان بازتاب دهنده در سطح عمود بر کاواک لیزر استفاده می‌شوند. در این موارد اگر طول موج مورد نظر شرط براگ را محقق سازد، بازتاب می‌یابد و اگر این شرط برآورده نشود از ساختار عبور خواهد کرد. این چنین ساختارها به طور چشم‌گیری موثر بعنوان پوشش‌های ضدانعکاس از سطح مورد استفاده قرار می‌گیرند و این خاصیت موجب کیفیت لنزها، منشورها و سایر ادوات نوری می‌شود. از آنجایی که بلور فوتونی یک بعدی یک ساختار لایه‌ای است بنابراین با استفاده از شیوه‌های محدودی می‌توان در

---

<sup>1</sup> V.P.Bykov

<sup>2</sup> E.Yablonoitch

<sup>3</sup> S.John

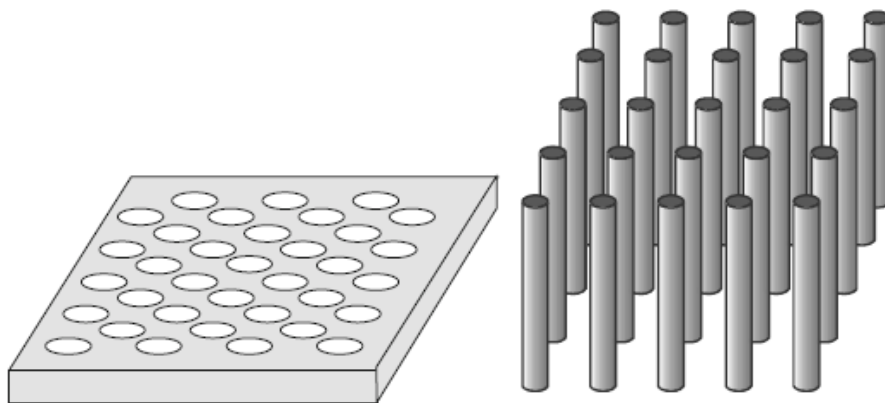
ساختارش تغییر ایجاد کرد و در واقع این شیوه‌ها تنها محدود به تغییر در ضریب شکست، ضخامت لایه‌ها و تعداد لایه‌های ساختار تناوبی می‌باشد [۲]. به همین دلیل این ساختار در این پایان‌نامه مورد بررسی قرار نگرفته است.

## ۲-۲-۲- بلورهای فوتونی دو بعدی

در بلورهای فوتونی دو بعدی، گذردهی الکتریکی در دو جهت بطور متناوب تغییر می‌کند، بنابراین از لحاظ پیکر بندی نسبت به PCهای یک بعدی دارای تنوع نسبتاً بیشتری می‌باشند [۲]. در واقع یک بلور فوتونی دو بعدی را می‌توان مانند یک آرایه متناوب از دو دی الکتریک با ضریب شکست‌های مختلف فرض نمود [۱۴]. در شکل (۲-۴) نمایی از این دو نوع ساختار شبکه‌های بلور فوتونی دو بعدی نشان داده شده است.

شبکه‌های بلور فوتونی دو بعدی معمولاً به دو شکل ساخته می‌شوند [۱۵]:

۱. استوانه‌هایی با ضریب شکست بالا در ماده‌ای با ضریب شکست پایین.
۲. استوانه‌هایی با ضریب شکست پایین در ماده‌ای با ضریب شکست بالا.



(ب)

(الف)

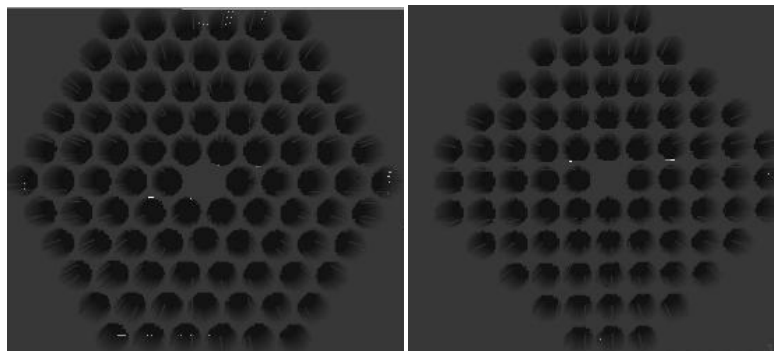
شکل (۲-۴) - نمایی از بلورهای دو بعدی (الف) آرایه دو بعدی از استوانه‌هایی با ضریب شکست بزرگتر در

محیطی با ضریب شکست کوچکتر و (ب) حفره‌های استوانه‌ای در محیطی با ضریب شکست بزرگ

واضح است که با تغییر شکل عناصر و جایگاهشان می‌توانیم به تعداد زیادی از انواع شبکه دست

یافت. اما از لحاظ فنی دو نوع رایج برای یک شبکه PC دو بعدی وجود دارد، PC مربعی، PC

مثلثی [۸]. در شکل (۲-۵) نمایی از این دو نوع PC دو بعدی نشان داده شده است.



(ب)

(الف)

شکل (۲-۵) - نمایی از یک شبکه PC (الف) مربعی و (ب) مثلثی

نمونه‌ای از بلورهای فوتونی دو بعدی، سیلیسکون متخلخل است که منافذش به صورت تناوبی

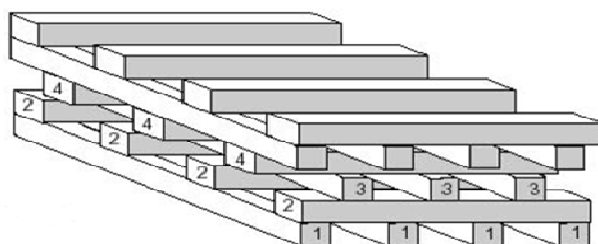
آرایش یافته‌است. این نوع بلورها را در طبیعت نیز می‌توان یافت، به عنوان مثال عامل موثر در



تولید بسیاری از رنگ‌های رنگین‌کمانی که در بال‌های نوع خاصی از پروانه دیده می‌شود، همین بلورهای فوتونی هستند [۲].

## ۳-۲-۲- بلورهای فوتونی سه بعدی

در بلورهای فوتونی سه بعدی همان‌طور که در شکل (۶-۲) نشان داده شده است گذردهی الکتریکی،  $\epsilon$  در هر سه راستا بطور تناوبی تغییر می‌کند. از آنجایی که روش‌های ساخت بلورهای فوتونی دو بعدی نسبت به نوع سه بعدی آسان‌تر بوده و بسیاری از خصوصیات بلورهای فوتونی سه بعدی را نیز دارند، لذا توجه به PC‌های دوبعدی نسبت به PC‌های سه بعدی بیشتر بوده است [۹]. یکی از مشهورترین بلورهای فوتونی سه بعدی سنگ با ارزش عقیق است. این سنگ به خاطر ویژگی‌های نوری منحصر به فردش از شهرت خاصی برخوردار است [۲]. در سال ۱۹۷۸ میلادی یابلونویچ [۱۶] و اس. جان [۱۷] ساختاری سه بعدی را پیشنهاد کردند که قادر بود به طور کامل از گسیل خود به خودی جلوگیری کند و شدت نور را نیز متمرکز سازد.



شکل (۶-۲) - نمایی از یک بلور فوتونی سه بعدی

بطور کلی بلورهای فوتونی از نظر جنس مواد تشکیل دهنده به سه دسته مختلف تقسیم می-  
شوند:

۱. فلز – دی الکتریک
۲. دی الکتریک – نیمه رسانا
۳. دو نیمه رسانا با ضرایب شکست مختلف

## ۲-۳- برهم کنش نور با بلورهای فوتونی

محدودیتی که سبب جلب توجه‌ها به سمت بلورهای فوتونی شد، گسیل خود به خودی نور می‌باشد. گسیل خود به خودی نور یک پدیده طبیعی است که موجب محدودیت عملکرد لیزرهای نیمه‌رسانا، سلول‌های خورشیدی و غیره می‌شود بنابراین انتظار می‌رفت که توانایی در کنترل گسیل خود به خودی نور اثر عمده‌ای در تکنولوژی داشته باشد به همین دلیل در حال حاضر ساخت انواع مختلف شبکه‌های بلور فوتونی با باند توقف فوتونی کوک‌پذیر موضوع پژوهش‌ها می‌باشد [۱۸]، [۱۹] و [۲۰] در واقع فوتون‌هایی که در لیزرها و تقویت کننده‌های تار نوری به طور خود به خود گسیل می‌شوند، منبع نویز به شمار می‌روند که به محض انتشار سایر یون‌ها را برانگیخته کرده و بدین ترتیب باعث تقویت فوتون‌های خود به خود گسیل شده می‌شوند. به این پدیده<sup>۱</sup> ASE گفته می‌شود [۲۱]. با ایجاد باندهای ممنوعه فوتونی می‌توان پهنای باند ASE را محدود کرد و بدین ترتیب از اتلاف توان جلوگیری نمود. از مهم‌ترین ویژگی‌های بلورهای فوتونی که تعیین کننده مفهوم کاربردی آنها نیز هست، حضور باند توقف فوتونی در این ساختارها می‌باشد. باند توقف فوتونی<sup>۲</sup> (PBG)، منسوب به بازه‌ای از انرژی یا فرکانس

---

<sup>۱</sup> Amplified Spontaneous Emission

<sup>۲</sup> Photonic -Band -Gap

است که انتشار نور در آن بازه خاص در داخل ساختار ممنوع می‌باشد. اگر تابشی با این

فرکانس به داخل ساختار باند گاف فوتونی وارد شود به طور کامل منعکس می‌شود [۲].

بطور کلی باند ممنوعه فوتونی را می‌توان با تغییر پارامترهای زیر تغییر داد:

۱. تعداد لایه‌ها

۲. دوره تناوب

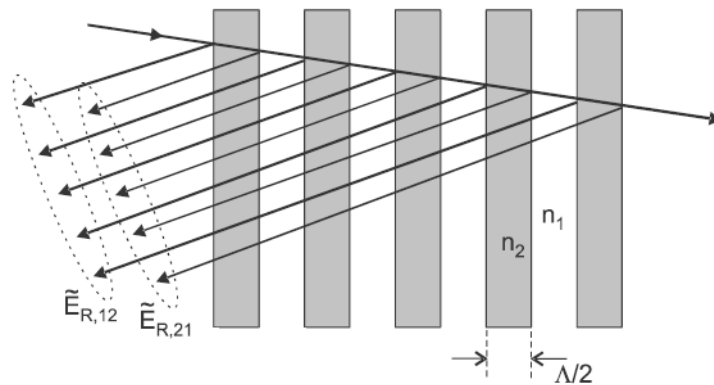
۳. پهنای لایه‌ها

۴. ضریب شکست لایه‌ها

۵. زاویه نور فرودی

۶. قطبش نور فرودی

از نظر فیزیکی می‌توان گفت که موج در هنگام پیشروی در محیط ناهمگن به تدریج منعکس می‌شود. این مطلب به‌وضوح در شکل (۲-۷)، نشان داده شده است. در بعضی از بازه‌های فرکانسی بین امواج تابشی و بازتابشی تداخل صورت می‌گیرد و در نتیجه انتشار موج تداوم می‌یابد، در این حالت بسامد در نوار مجاز قرار دارد. در حالتی که بین امواج تابیده و بازتابیده تداخل مخرب صورت گیرد، موج بازتاب کلی کرده و انتشار نور غیر ممکن می‌شود، که این حالت به باند ممنوعه فوتونی اشاره دارد [۸].



شکل (۷-۲) - نحوه انتشار موج نوری در یک ماده چند لایه و پرتوهای بازتابیده از آن در مرز لایه‌ها. میدان  $\vec{E}_{r,12}$  مربوط به تمامی امواج بازتابیده از مرزهای  $n_1 \rightarrow n_2$  می‌باشد به طور متناظر  $\vec{E}_{r,21}$  مربوط به تمامی بازتاب‌ها از مرزهای  $n_2 \rightarrow n_1$  است.

## ۴-۲- نقص در بلورهای فوتونی

یک بلور فوتونی کامل، آرایه تناوبی از یک سلول واحد است که در تمام فضا تکرار شده باشد. اگر در ناحیه‌ای نظم این ساختار تناوبی از بین برود، در ساختار بلور فوتونی نقص بوجود می‌آید. وجود نقص در بلورهای فوتونی سبب ایجاد تغییرات قابل توجهی در مشخصات و ویژگی‌های بلور فوتونی، از جمله پهنای باند ممنوعه و ضرایب بازتاب و عبور می‌شود [۸]. در حقیقت برای افزایش قابلیت‌های کاربردی بلورهای فوتونی به ناخالص‌سازی در ساختار نیاز داریم، که این ناخالص‌سازی مشابه ناخالص‌سازی است که در نیمه هادی‌ها انجام می‌شود. در این حالت ناخالص‌سازی با اضافه کردن یا برداشتن یک مقدار مشخص از ماده دی‌الکتریک صورت می‌پذیرد و به این ترتیب حالت تناوبی سیستم نقض می‌شود. بخش‌هایی از بلور در دو طرف نقص مانند آئینه عمل می‌کنند به طوری که نور در فضای میان آنها به دام می‌افتد و از آنجا که فاصله میان آئینه‌ها از مرتبه طول موج نور است مدها کوانتیزه خواهند بود [۵]. در شکل (۲-۲)