

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه سلیمانیه و بلوچستان  
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

# نور کند

## Slow Light

استاد راهنما: دکتر محمد علی منصوری بیرجندی

ارایه دهنده: مرتضی جان فزا (۹۰۴۰۷۸۴)

ایمیل: [m\\_janfaza@mail.usb.ac.ir](mailto:m_janfaza@mail.usb.ac.ir)

پاییز ۱۳۹۲

## فهرست مطالب

- ۱- تعریف نور کند
- ۲- روش های ایجاد نور کند
- ۳- مقایسه روش های ایجاد نور کند
- ۴- ویژگی های بلور فوتونی برای ایجاد نور کند
- ۵- معیارهای مقایسه در ایجاد نور کند
- ۶- شرایط ایجاد نور کند در موجبر بلور فوتونی تیغه‌ای
- ۷- پارامترهای مهم در ناحیه نور کند
- ۸- کاربردهای نور کند
- ۹- مهندسی پاشیدگی در ناحیه نور کند
  - ۹-۱- دلایل نیاز به مهندسی پاشیدگی در ناحیه نور کند
  - ۹-۲- روش های مبتنی بر مهندسی پاشیدگی

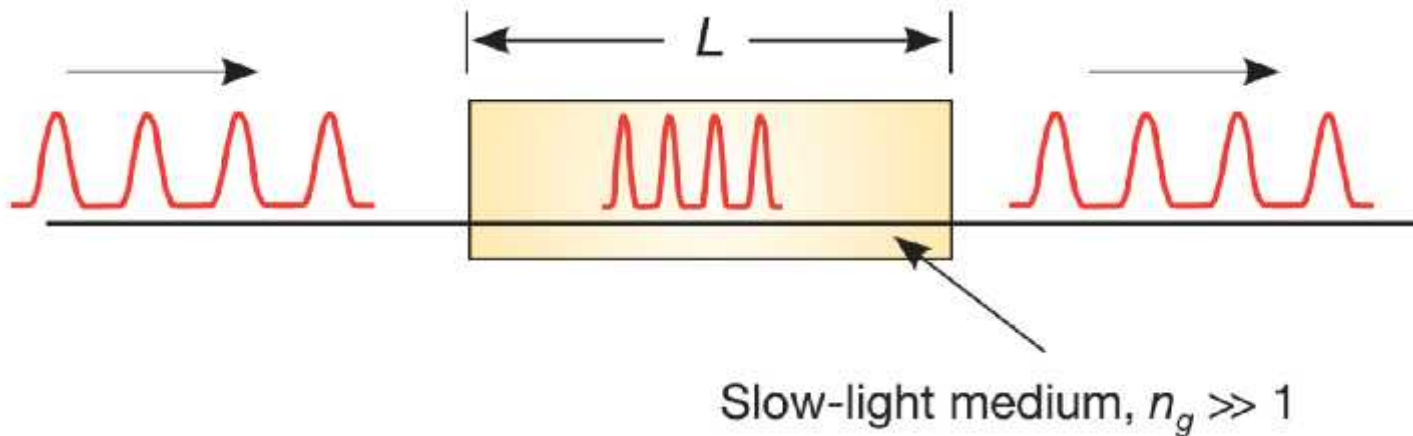
## ۱- تعریف نور کند

نور کند: پدیده فیزیکی انتشار نور در محیط ها و ساختارها با سرعت گروه کاهش یافته.

در این محیط ها و ساختارها سرعت گروه نور بسیار کمتر از سرعت نور در خلأ است.

سرعت انتشار نور در خلا در حدود  $3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$  است. با این سرعت نور در یک ثانیه  $7/5$  مرتبه به دور کره زمین می چرخد.

این سرعت بالا برای انتقال داده ها بین دو نقطه بسیار مناسب است ولی کنترل داده ها با این سرعت بسیار مشکل است.

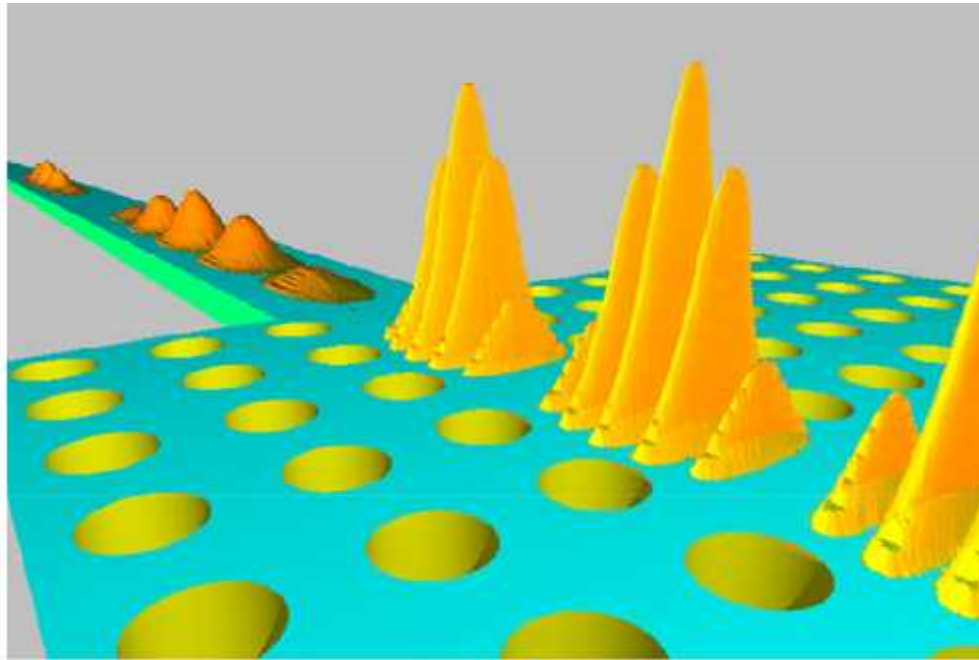


## ۱- تعریف نور کند

پالس نوری در مکان فشرده  
چگالی انرژی پالس در زمان افزایش

با انتشار پالس نوری در ناحیه نور کند:

این پدیده به دلیل افزایش برهم کنش نور با ماده است.



## ۲- روش های ایجاد نور کند

به چهار روش می توان نور کند ایجاد کرد که عبارتند از:

۱- شفافیت القا شده الکترومغناطیسی (EIT) **Electromagnetically Induced Transparency**

۲- نوسان جمعیت همدوس (CPO) **Coherent Population Oscillation**


۳- پراکندگی بریلیون تحریک شده (SBS) **Stimulated Brillouin Scattering**


و یا رامان تحریک شده (SBS) **Stimulated Raman Scattering**

۴- بلور فوتونی (PhCs) **Photonic Crystals**

## ۲- روش های ایجاد نور کند

### ۱- روش EIT

این روش در سال ۱۹۹۰ توسط گروه **Harris** بکار برده شد. 

در این روش، ایجاد نور کند با کاهش اثر جذب در **اتمهای گازی سه ترازی** توسط اثر **همدوسی نور** بدست می آید. 

۱- پهنای باند کوچک

۲- عملکرد در دمای پایین

معایب این روش 

## ۲- روش های ایجاد نور کند

### ۲- روش CPO

- ❑ در دمای اتاق، یک اثر مشابه به EIT را نوسانگر تجمع همدوس CPO می گویند.
- ❑ این روش در سال ۲۰۰۳ توسط گروه Boyd برای حل مشکل دما بکار برده شد.
- ❑ با این روش می توان نور کند را در کریستال، فیبرهای دوپ شده و یا نیمه هادی ها نشان داد.



## ۲- روش های ایجاد نور کند

### ۳- روش SBS و یا SRS

این روش در سال ۲۰۰۵ توسط گروه **Gonzalez** برای ایجاد نور کند بکار برده شد.

این روش به منظور **تنظیم پذیری تاخیر** مورد استفاده قرار گرفت.

فناوری ساخت بسیار **پیچیده**

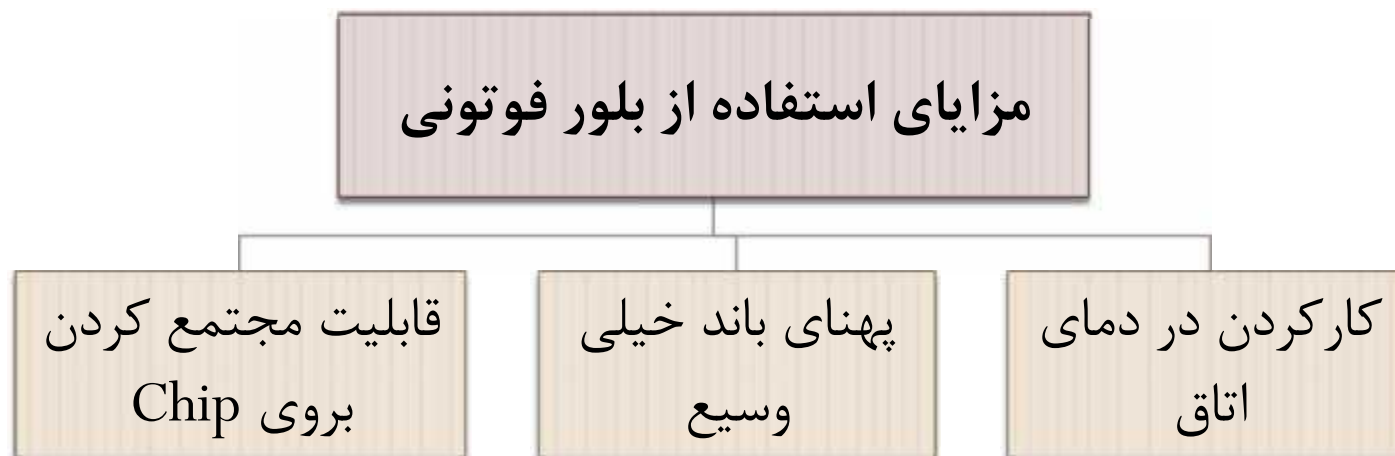
هزینه **خیلی گران**

معایب این روش

## ۲- روش های ایجاد نور کند

### بلور فوتونی (PhCs):

در مقایسه با سایر روش های تولید نور کند، استفاده از **بلورهای فوتونی** برای تولید نور کند دارای مزایای فراوانی است.



### ۳- مقایسه روش های ایجاد نور کند

سال ارایه روش	اندازه	سرعت	پهنای باند ( $\nu$ )	تلفات	ضریب کاهش سرعت نور ( $S=\nu / \nu_g$ )	دما (K)	نوع روش
۱۹۹۰	فشرده	سریع	۳۰ MHz	زیاد	۱۶۵	پایین ۱۰	<b>EIT</b>
۲۰۰۳	فشرده	سریع	۲ GHz	زیاد	~ ۱۰k	۳۰۰	<b>CPO</b>
۲۰۰۲ و ۲۰۰۵	فشرده	سریع	۱ THz	زیاد	~ ۱	۳۰۰	<b>SBS</b> <b>SRS</b>
۲۰۰۱	فشرده	پایین	۲/۵ THz	کم	۱۲	۳۰۰	<b>PhCs</b>

## ۳- مقایسه روش های ایجاد نور کند

❑ ضریب کاهش سرعت نور، پارامتر مناسبی برای مقایسه سیستم های مبتنی بر نور کند است، که به صورت نسبت

سرعت گروه به سرعت فاز تعریف می شود:

$$S = v / v_g$$

❑ برای افزایش میزان تاخیر، باید سرعت گروه کاهش پیدا کند، که این کاهش باعث افزایش ضریب کاهش سرعت نور

می شود.

❑ افزایش پارامتر S با روشهای افزایش ضریب شکست، تغییر پاشیدگی ماده، و پاشیدگی موجبر امکان پذیر

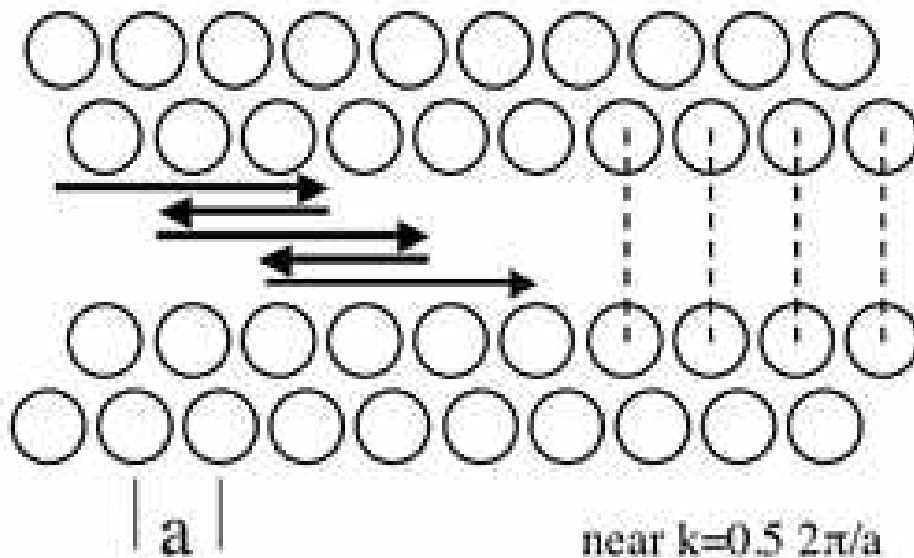
است.

## ۴- ویژگی های بلور فوتونی برای ایجاد نور کند

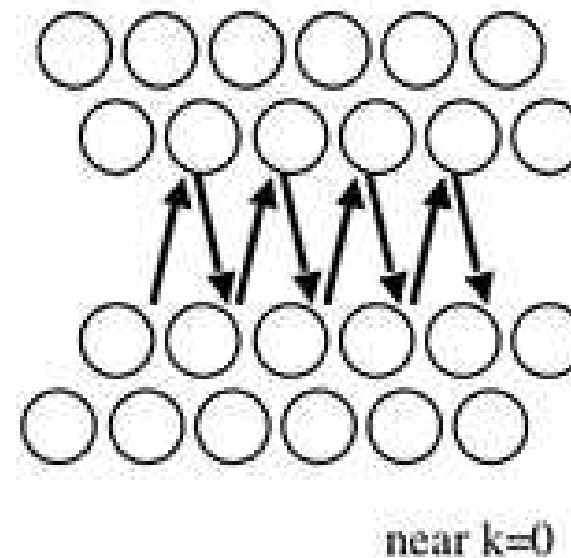
۱- پراکنده شدن (Backscattering)

۲- بازتاب تک جهتی (Omnidirectional reflection)

ویژگی های بلورهای فوتونی در ایجاد نور کند:



Backscattering



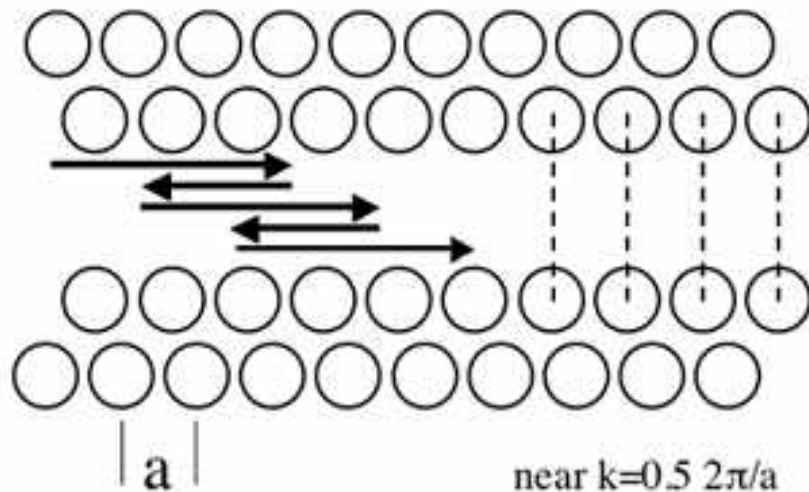
Omnidirectional reflection

## ۴- ویژگی های بلور فوتونی برای ایجاد نور کند

### ۱- پراکنده شدن

اگر موج پیش رونده و موج پراکنده شده برگشتی در بلور فوتونی دارای فاز و دامنه یکسان باشند، یک موج ساکن بوجود می آید، که این امر در مرز ناحیه بریلوین بلور فوتونی ( $k=0.5[2\pi/a]$ ) اتفاق می افتد.

در مرز ناحیه بریلوین **برهمکنش امواج** ایستا پیش رونده و پس رونده **خیلی زیاد** است چون این **امواج هم فاز** هستند بنابراین **سرعت گروه** در این ناحیه صفر است.



در نزدیکی مرزهای ناحیه بریلوین ناحیه نور کند وجود دارد که در آن امواج پیش رونده و پس رونده دیگر هم فاز نبوده و تداخل آنها یک **موج متحرک کند** را بوجود می آورد.

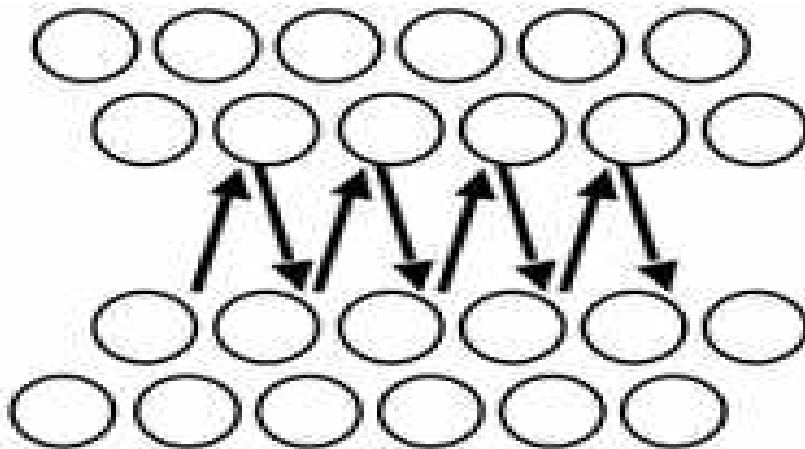
## ۴- ویژگی های بلور فوتونی برای ایجاد نور کند

### ۲- بازتاب تک جهتی

از ویژگی های منحصر به فرد دیگر ساختار بلور فوتونی این است که زاویه **cut-off** وجود ندارد.

یعنی نور بدون هیچ بازتابی درون بلور فوتونی منتشر می شود.

در ساختار نوار، انتشار نور بدون بازتاب متناظر با انتشار نور در نزدیکی لبه ی مرز بریلوین نقطه یعنی  $k=0$  است.



near  $k=0$

## ۵- معیارهای مقایسه در ایجاد نور کند

معیارهای مقایسه روش های مختلف ایجاد نور کند عبارتند از:

۱- حجم قطعه ساخته شده

۲- پهنای باند

۳- پاشیدگی

۴- میزان تاخیر

۵- پیچیدگی ساخت

۶- هزینه

۷- پایداری حرارتی



## ۵- معیارهای مقایسه در ایجاد نور کند

### ۱- حجم قطعه ساخته شده

مهم ترین هدف در ابتدا این است که طراحی قطعه مورد نظر باید به گونه ای باشد که بتوان از آن در مدارهای مجتمع نوری استفاده کرد. بنابراین باید ابعاد قطعه مورد نظر بسیار **کوچک و فشرده** باشد. با استفاده از نور کند در بلور فوتونی نشان داده شده است، که ابعاد افزاره نوری به طور چشم گیری **کاهش** می یابد.

### ۲- پهنای باند

یکی از کاربردهای نور کند در **بافرهای نوری  $N \times N$**  است. ظرفیت بافر نوری به **پهنای باند** آن بستگی دارد. هر چه پهنای باند **کوچک** باشد، تعداد بیت کمتری در واحد زمان اجازه ی ذخیره سازی دارد.

## ۵- معیارهای مقایسه در ایجاد نور کند

### ۳- پاشیدگی

مقدار پاشیدگی بالا در سیستم های نوری باعث **اعوجاج شکل پالس نوری** می شود.

به دلیل پاشیدگی خیلی زیاد در ناحیه نور کندی که در آن مهندسی پاشیدگی صورت نگرفته است، پالس نوری در حین انتشار در ناحیه نور کند در واحد زمان پهن شده و در طول چند پریود پالس نوری به دلیل پاشیدگی از بین می رود.

### ۴- میزان تاخیر

یکی از پارامترهای بسیار مهم در ناحیه ی نور کند، **میزان تاخیر** است.

در طراحی سیستم های نور کند یکی از اصلی ترین اهداف داشتن **میزان تاخیر قابل تنظیم بالا** است، در حالی که شکل پالس نوری دچار اعوجاج نشود.

ولی عملاً در سیستم های تاخیری علاوه بر داشتن تنظیم پذیری کم، به دلیل پاشیدگی خیلی زیاد پالس نوری خراب می شود.

## ۵- معیارهای مقایسه در ایجاد نور کند

### ۵- پیچیدگی ساخت

طراحی افزارها با فرایند **ساخت آسان تر**، یکی از اهداف طراحی افزارها های تمام نوری محسوب می شود.

به عنوان مثال فناوری ساخت افزارها با **سیلیکون** بسیار ساده و پرکاربردتر است.

### ۶- هزینه

هزینه معیار بسیار مهمی در **طراحی افزارها** محسوب می شود.

استفاده از بلور فوتونی تیغه ای به دلیل **ابعاد بسیار کوچک شان**، **ساخت آسان تر**، **قابلیت تکرار پذیری**، در

**دسترس بودن مواد اولیه (سیلیکون)**، و **قابلیت پیاده سازی در مدارهای مجتمع نوری** در میزان هزینه صرفه

جویی می شود.

## ۵- معیارهای مقایسه در ایجاد نور کند

### ۷- پایداری حرارتی

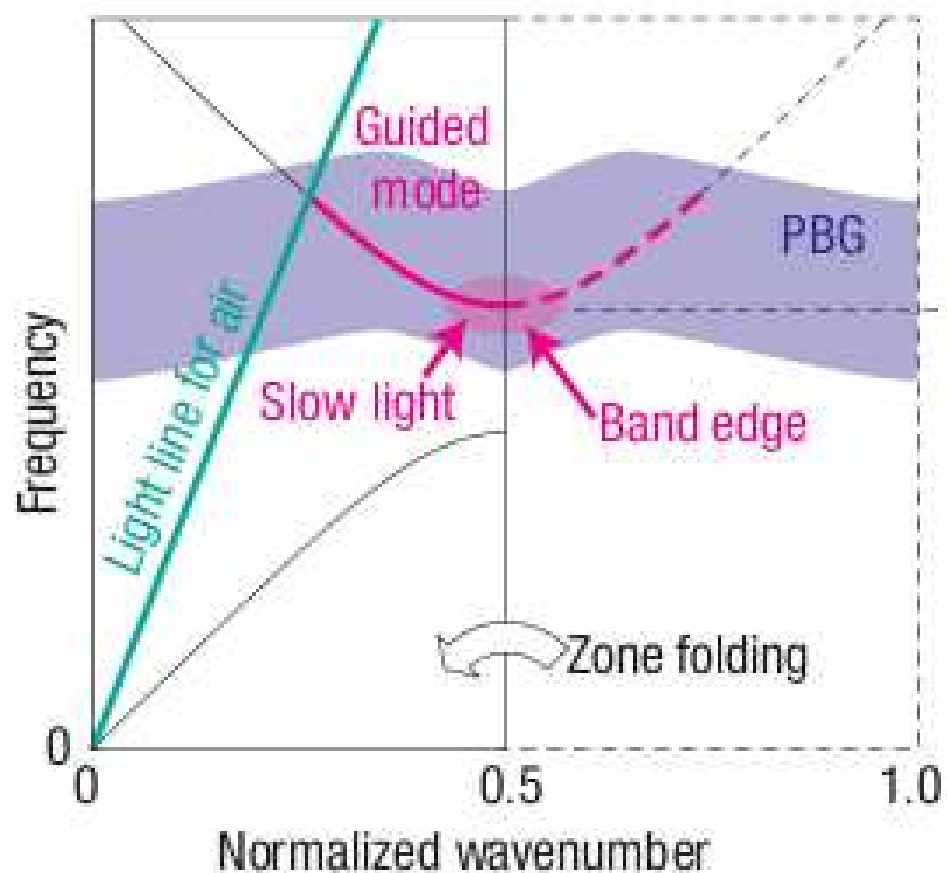
❏ در طراحی افزاره های تمام نوری، تلاش می شود که پارامترهای آنها از **گستره ی دمایی مستقل** باشد.

❏ به عنوان مثال تکنیک شفافیت القا شده مغناطیسی (EIT) که یکی از روش های ایجاد نور کند محسوب

می شود در دمای اتاق **قابل پیاده سازی نیست** .

## ۶- شرایط ایجاد نور کند در موجبر بلور فوتونی تیغه‌ای

■ بطور کلی **چهار مورد** برای ایجاد نور کند لازم داریم:



۱- عملکرد زیر مخروط نور

۲- قسمت تخت منحنی پاشیدگی

۳- تقارن زوج

۴- شرایط تک‌مد

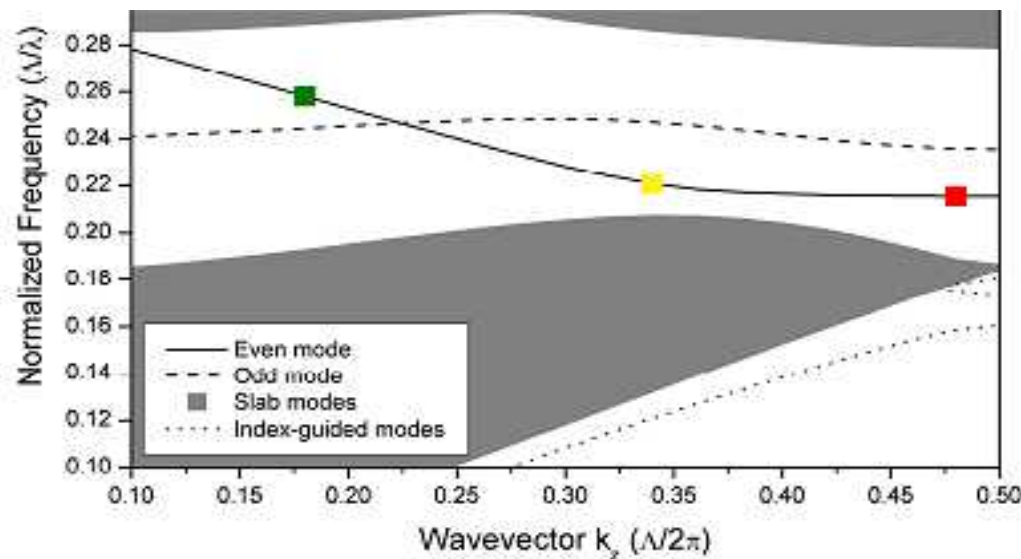
## ۶- شرایط ایجاد نور کند در موجبر بلور فوتونی تیغه‌ای

مدهای زیر خط نور ذاتاً تلفات کمتری نسبت به مدهای بالای خط نور دارد.

مدهای در موجبر دو ناحیه مجزا را در زیر خط نور بوجود می آورند که عبارتند :

۱- مدهای هدایت شده ضریب شکستی **index-guiding** ( مدهای مربوط به منطقه نور تند)

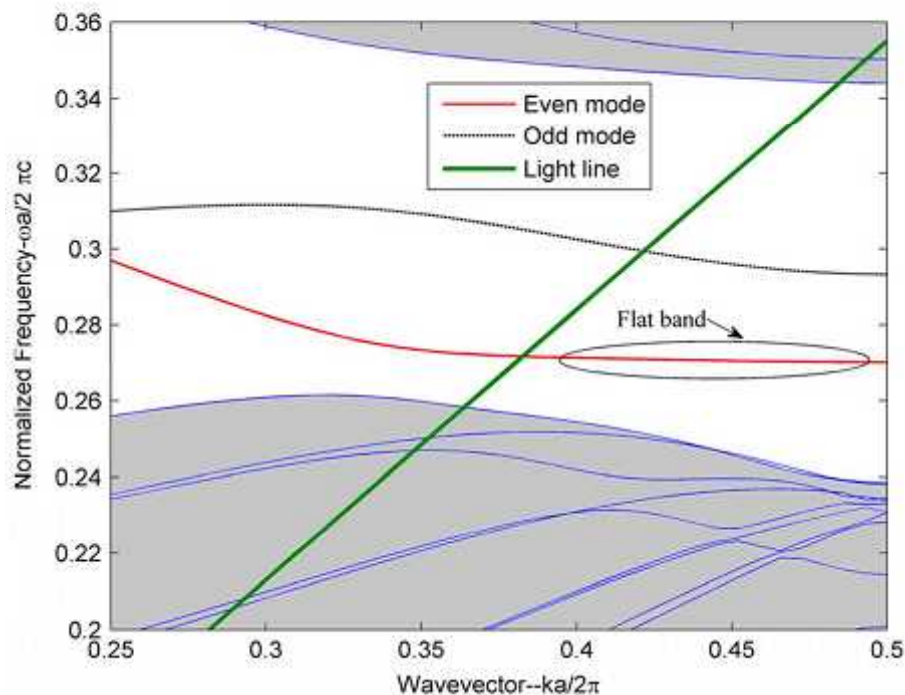
۲- مدهای هدایت شده گاف نواری **gap-guiding** ( مدهای مربوط به منطقه نور کند)



## ۶- شرایط ایجاد نور کند در موجبر بلور فوتونی تیغه‌ای

شیب منحنی پاشیدگی در منطقه نور کند، نه تنها باید کوچک باشد، بلکه باید ثابت هم باشد.

مشتقات مرتبه بالاتر منحنی پاشیدگی منجر به پاشیدگی سرعت گروه و پاشیدگی مرتبه سوم می شوند.



که باعث پالس ورودی دچار اعوجاج شود.

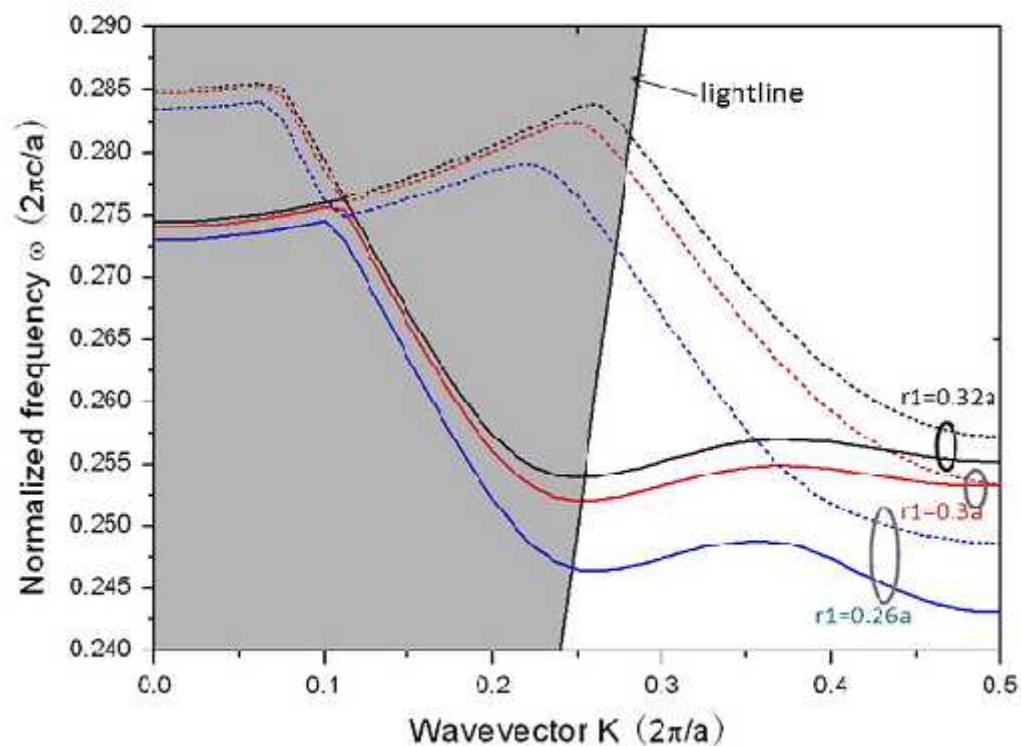
برای نشان دادن این ویژگی از اصطلاح

"Flatband" استفاده شده است.

## ۶- شرایط ایجاد نور کند در موجبر بلور فوتونی تیغه‌ای

تقارن زوج به منظور تسهیل در تزویج پالس نوری به ورودی موجبر لازم است که معمولاً پالس نوری از

نوع گاوسی است.



شرایط تک‌مد برای جلوگیری از تلفات

ناشی از تزویج بین مدی لازم است.



## ۷- پارامترهای مهم در ناحیه نور کند

- I. سرعت گروه ( $v_g$ ) ↓
- II. ضریب شکست گروه ( $n_g$ ) ↑
- III. پاشیدگی سرعت گروه (GVD: 2) ↓
- IV. حاصل ضرب تاخیر در پهنای باند بهنجار شده (NDBP)
- پارامترهای مهم در ناحیه نور کند

این پارامترها بصورت زیر بیان می شود:

$$v_g = \frac{d\check{S}}{dk}$$

$$n_g = \frac{c}{v_g} = c \frac{dk}{d\check{S}}$$

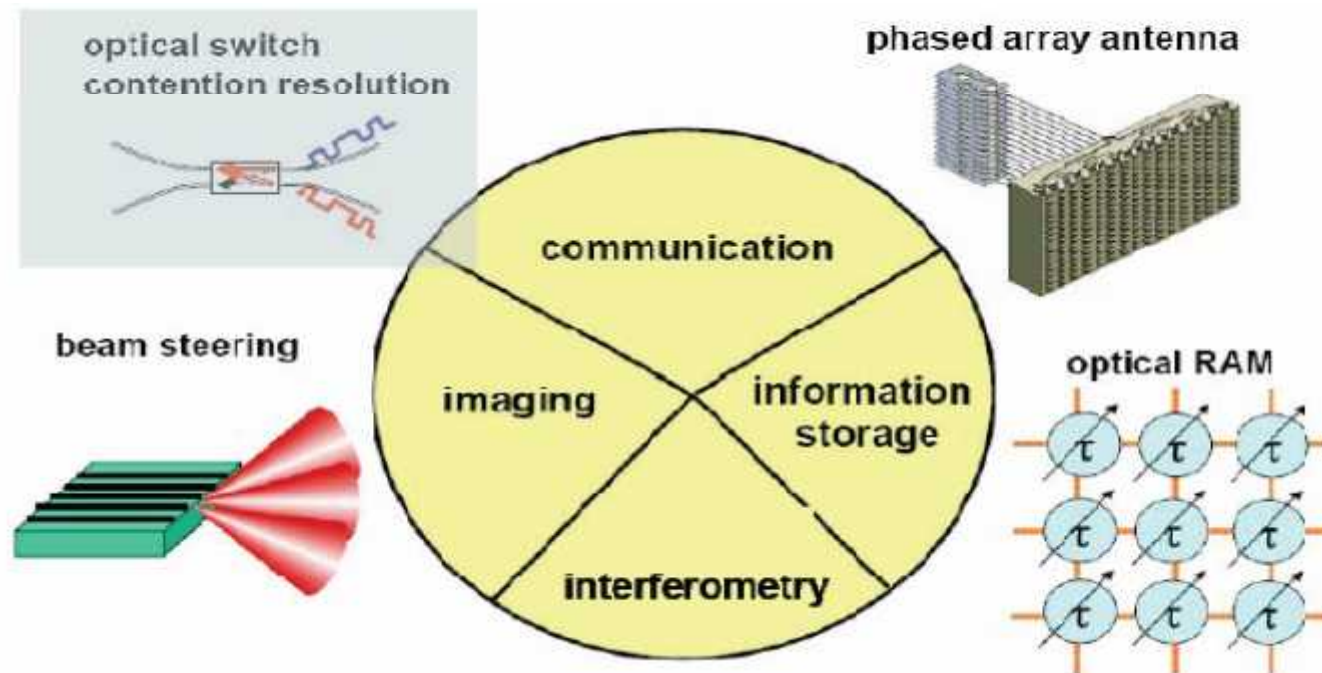
$$S_2 = \frac{d^2k}{d\check{S}^2} = \frac{1}{c} \frac{dn_g}{d\check{S}}$$

$$NDBP = n_g \cdot \frac{\Delta\check{S}}{\check{S}_0} = n_g \cdot \frac{\Delta}{\}c}$$

## ۸- کاربردهای نور کند

کاربردهای نور کند، در طراحی لیزر، تقویت کننده، بافرهای نوری، آشکارساز، مدولاتورها و مبدل طول موج.

همچنین نور کند در زمینه های دیگر از جمله پردازش تصویر، پزشکی، طراحی حافظه ها و غیره کاربرد دارد.



## ۹- مهندسی پاشیدگی در ناحیه نور کند

۱- پاشیدگی سرعت گروه (GVD) خیلی زیاد

۲- مراتب بالای پاشیدگی

محدودیت های انتشار پالس نوری  
در ناحیه نور کند:

با افزایش پاشیدگی، پالس در هنگام انتشار درون بلور فوتونی در ناحیه نور کند شکل خود را از دست داده و از بین خواهد رفت .

برای بهره مندی از مزایای نور کند مهندسی پاشیدگی در ناحیه نور کند ضروری است.

## ۹-۱- دلایل نیاز به مهندسی پاشیدگی در ناحیه نور کند

سرعت گروه در لبه شکاف برای بلور فوتونی تقریباً صفر است. 

به نظر می رسد این ناحیه برای ایجاد نور کند مناسب است. 

۱- پهنای باند کم

معایب ایجاد نور کند در لبه شکاف باند :

۲- پاشیدگی بالا

پهنای باند کم جهت استفاده در سیستمهای با سرعت بالا مناسب نیست. 

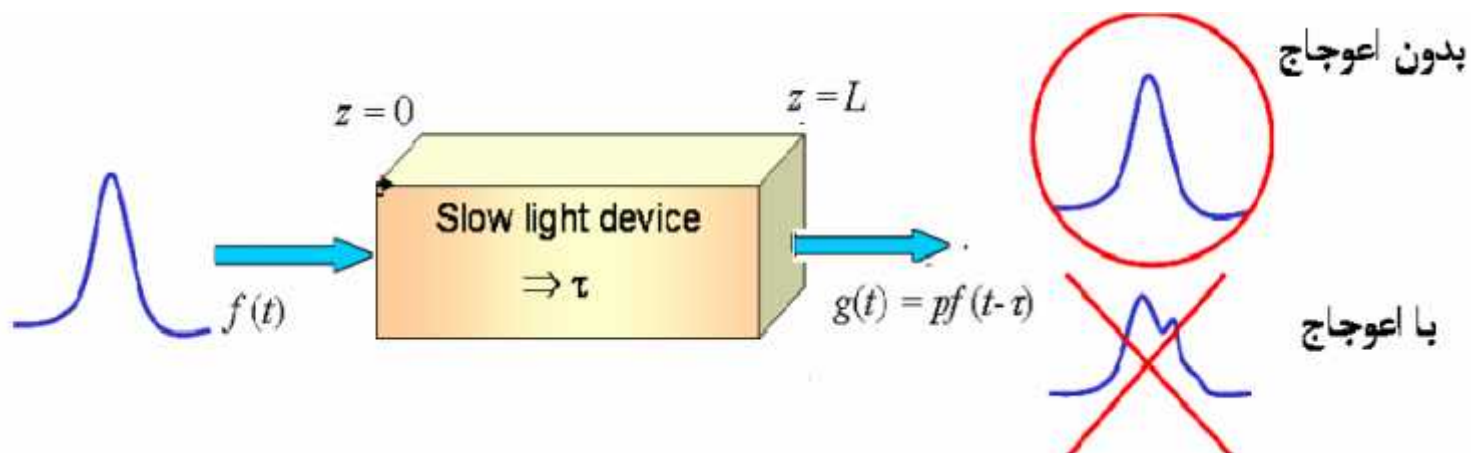
پاشیدگی بالا موجب اعوجاج و ازبین رفتن شکل پالس خواهد شد. 

### ۳-۱- دلایل نیاز به مهندسی پاشیدگی در ناحیه نور کند

در حالت ایده آل، پالس خروجی شبیه پالس ورودی است.

بدلیل حضور اثرات پاشیدگی چشمگیر در ناحیه نور کند، پالس های خروجی دچار اعوجاج خواهند شد.

جهت کاهش اعوجاج پالس های سریع در ناحیه نور کند، مهندسی پاشیدگی یکی از بحث های اصلی در ناحیه نور کند می باشد.



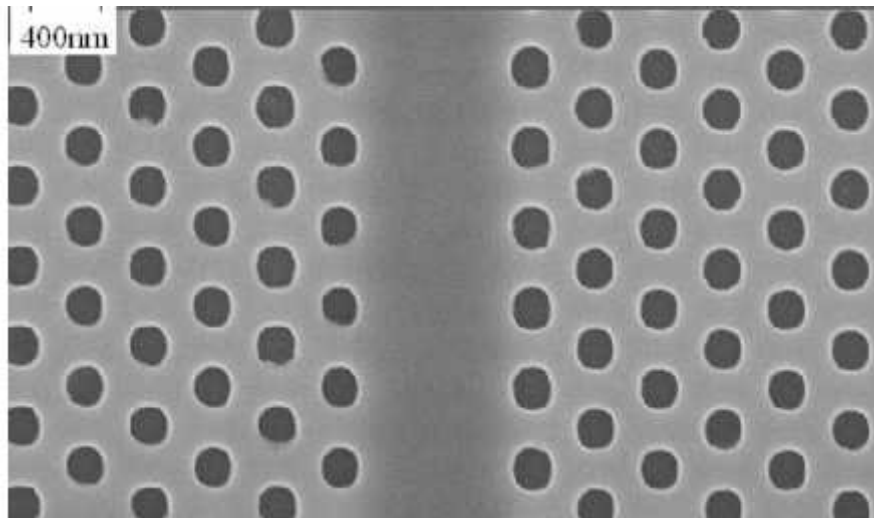
## ۹-۲- روش های مبتنی بر مهندسی پاشیدگی

دو روش کلی مهندسی پاشیدگی عبارتند از:

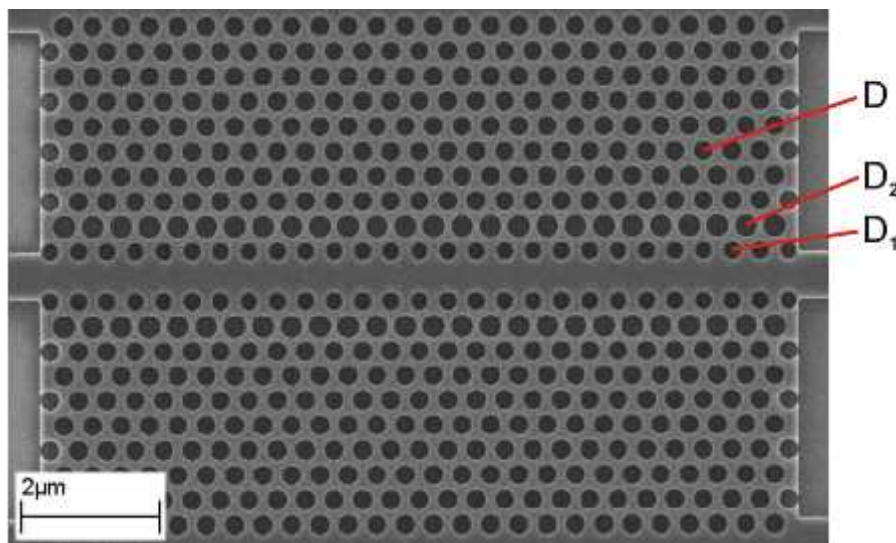
۱- کنترل پاشیدگی با استفاده از chirping موجر بلور فوتونی

۲- تغییر یا تنظیم هندسه موجر بلور فوتونی

## ۹-۲- روش های مبتنی بر مهندسی پاشیدگی



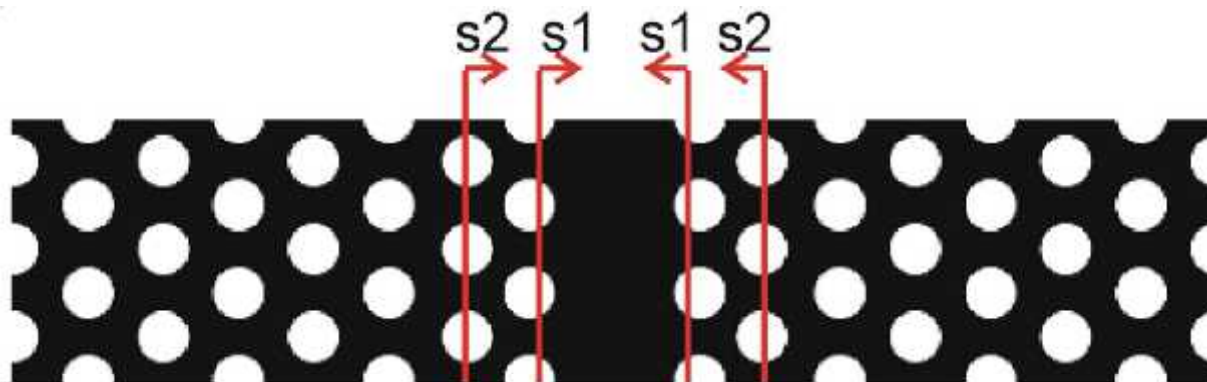
۱- تغییر عرض موجبر (Krauss-2006)



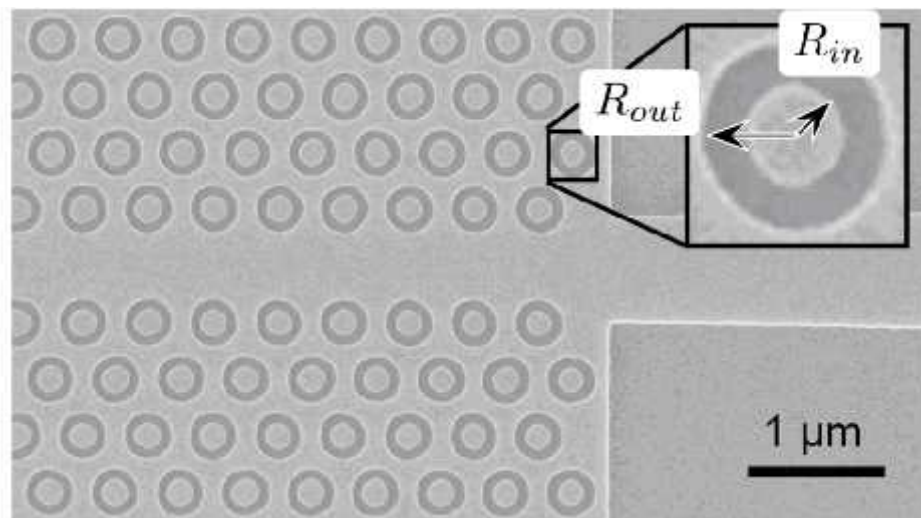
۲- تغییر اندازه حفره های هوا پیرامون موجبر (Borel-2006)

## ۹-۲- روش های مبتنی بر مهندسی پاشیدگی

۳- تغییر مکان حفره های هوا پیرامون موجبر (Krauss-2008)

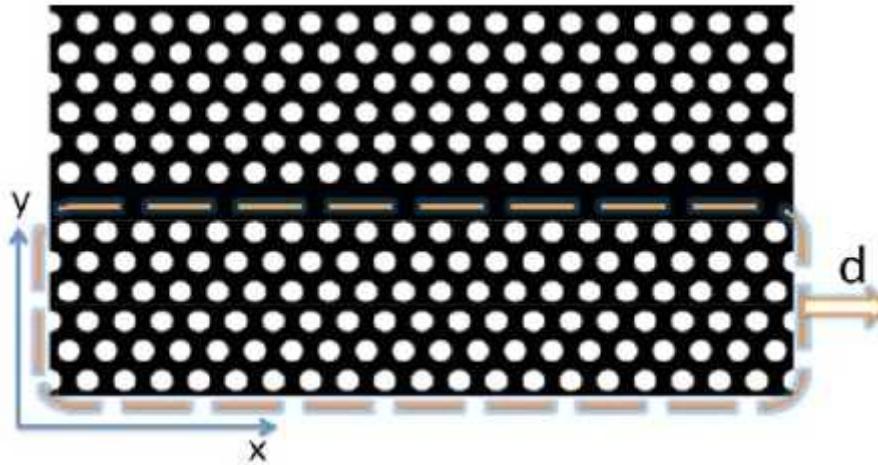


۴- استفاده از حفره های هوای حلقوی شکل در موجبر (Lipsanen-2007)





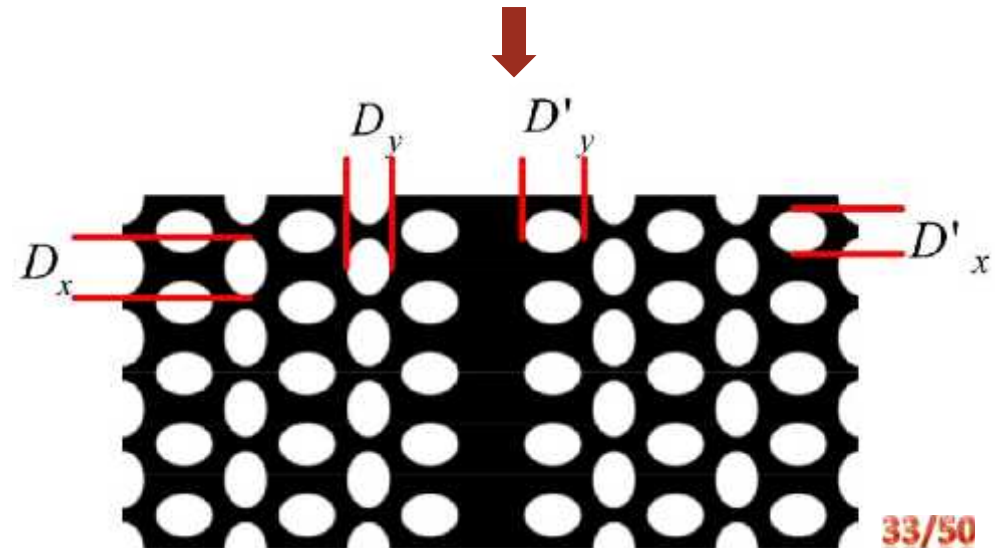
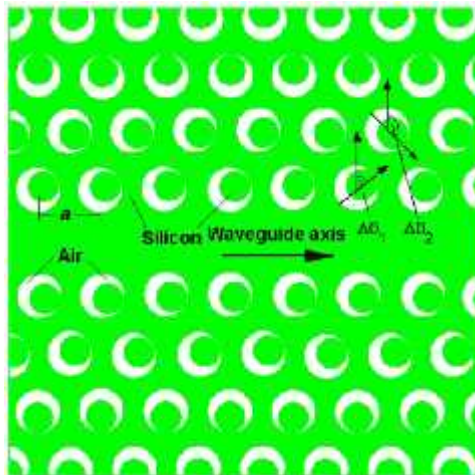
## ۹-۲- روش های مبتنی بر مهندسی پاشیدگی



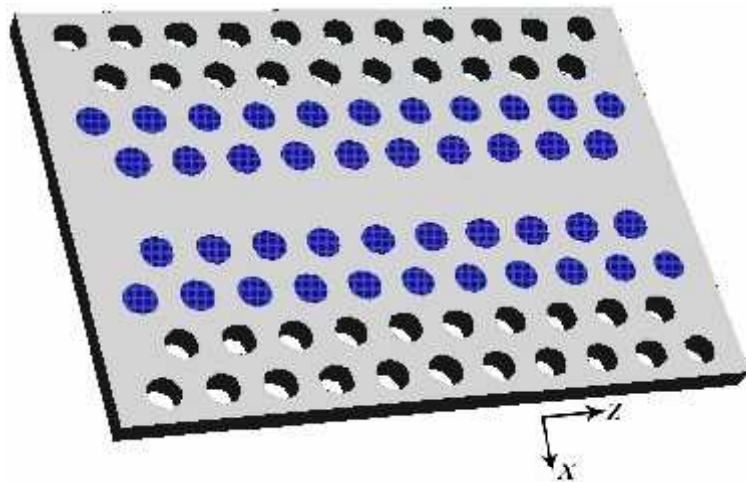
۵- استفاده از موجبر نامتقارن (Ma-2008)

۷- استفاده از حفره های هلالی شکل در موجبر بلور فوتونی (Meng-2012)

۶- استفاده از حفره های بیضوی شکل در موجبر بلور فوتونی (Xu-2013)

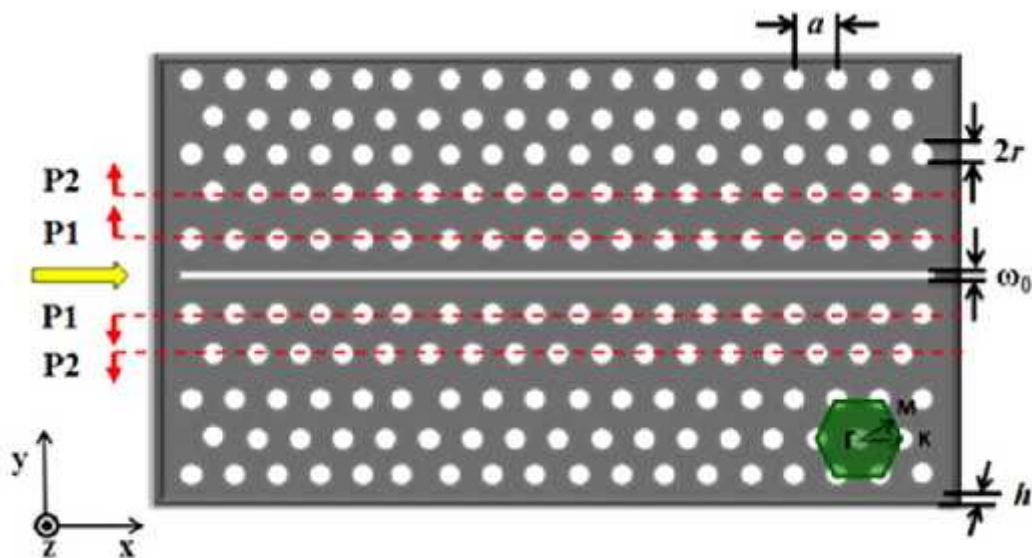


## ۹-۲- روش های مبتنی بر مهندسی پاشیدگی



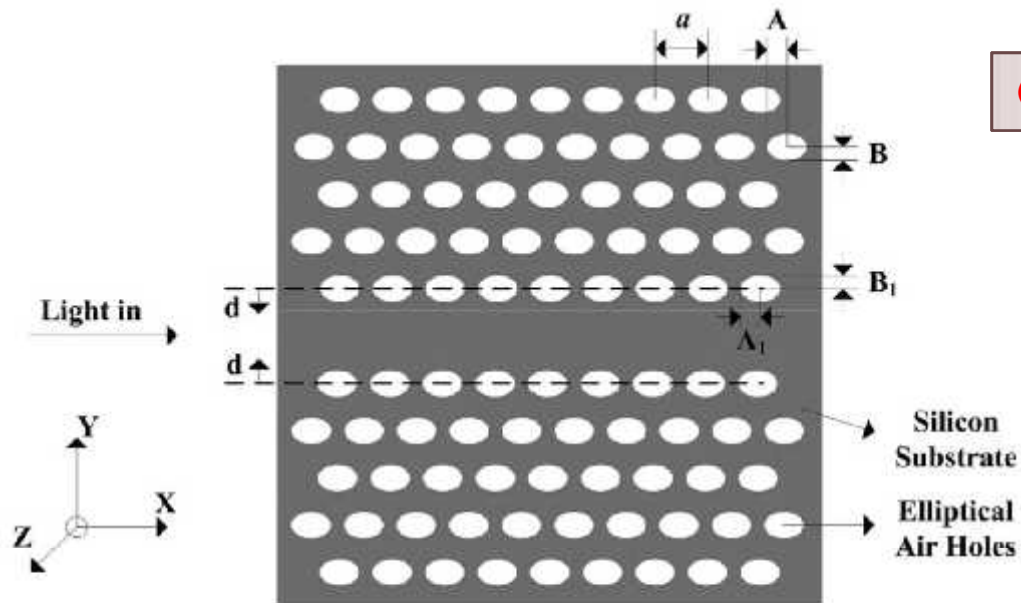
۸- تزریق سیال نوری در حفره های هوا پیرامون موجبر (ابن علی-۲۰۰۹)

۹- استفاده از موجبر با شکاف (Wang-2012)

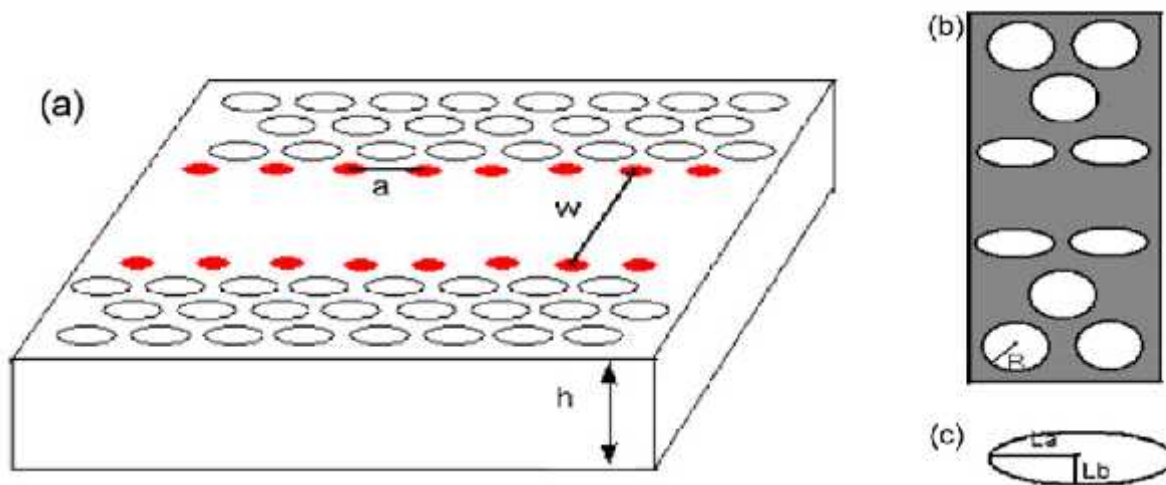


## ۹-۲- روش های مبتنی بر مهندسی پاشیدگی

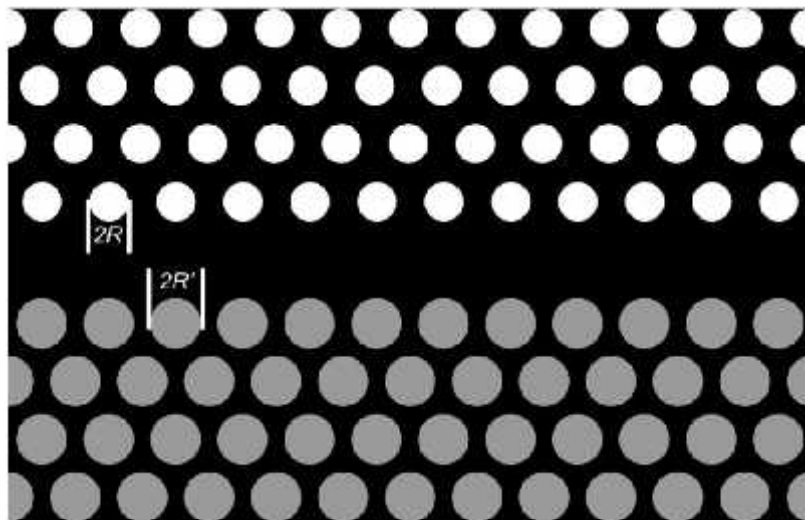
۱۰- استفاده از حفره های بیضوی شکل (Long-2010)



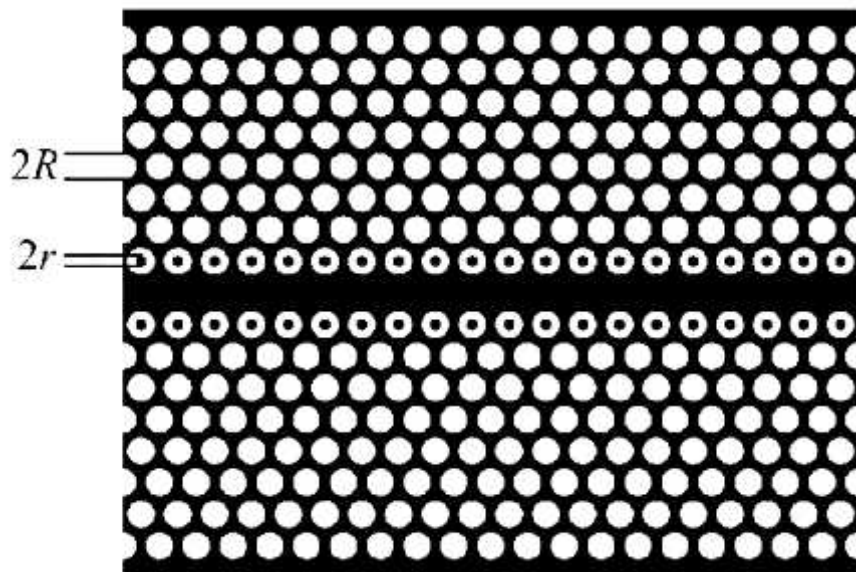
۱۱- استفاده از حفره های بیضوی در اولین ردیف نزدیک به مرکز موجبر (Shen-2011)



## ۹-۲- روش های مبتنی بر مهندسی پاشیدگی

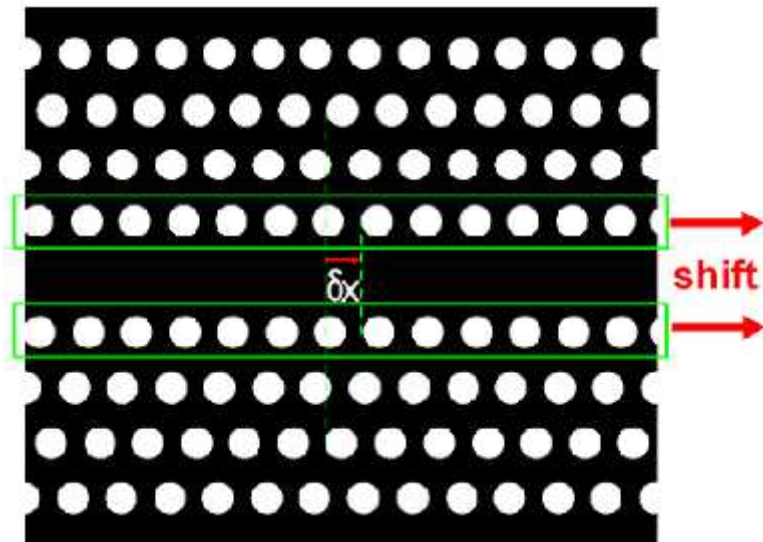


۱۲- استفاده از سیال نوری در Cladding پایین (Lü-2010)

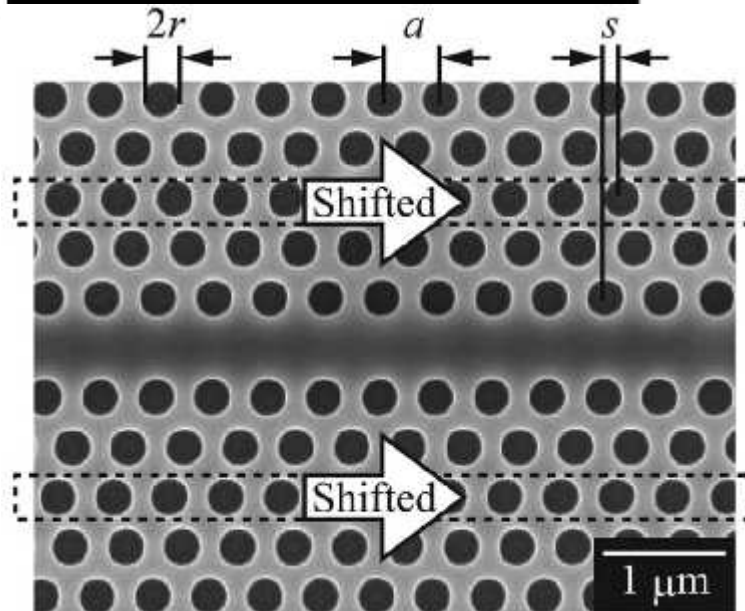


۱۳- استفاده از حفره های هوای حلقوی شکل در اولین ردیف نزدیک به مرکز موجبر (Hou-2009)

## ۹-۲- روش های مبتنی بر مهندسی پاشیدگی



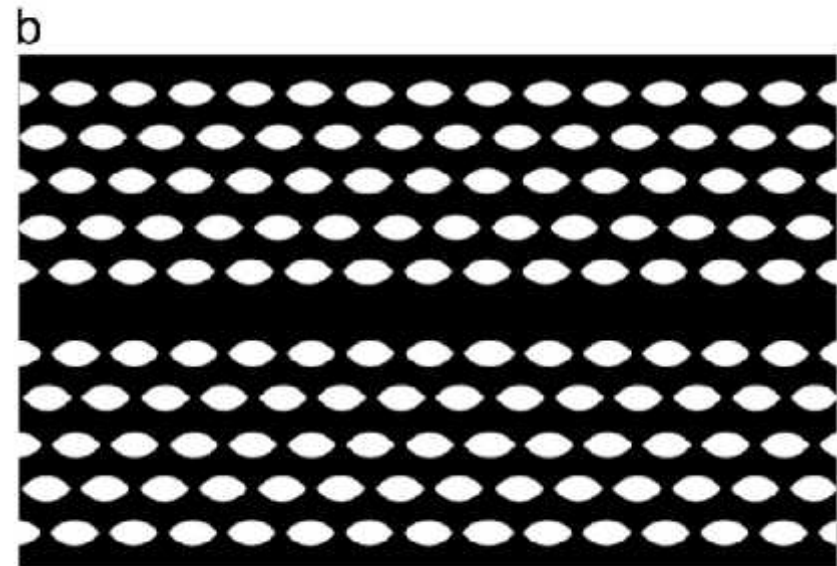
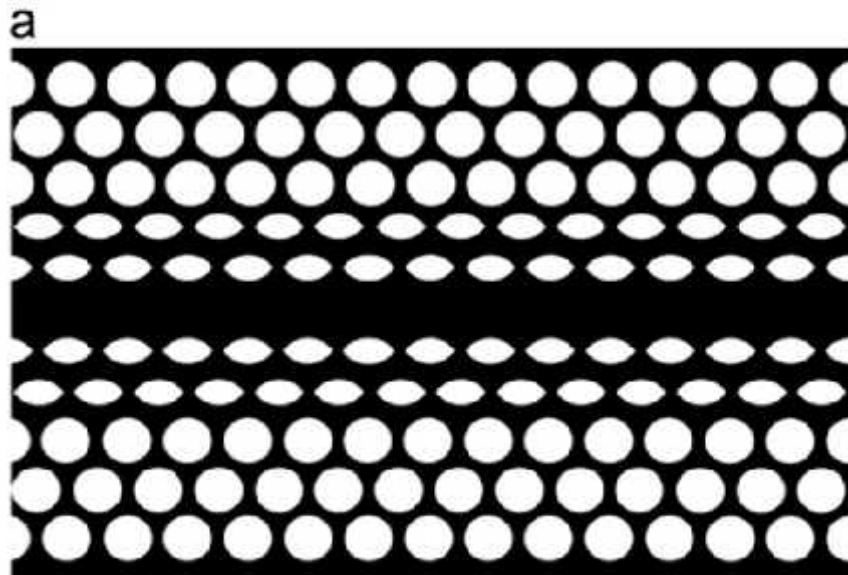
۱۴- تغییر مکان حفره های هوا اولین ردیف نزدیک  
به مرکز موجبر (Hao-2010)



۱۵- تغییر مکان حفره های هوا سومین ردیف نزدیک  
به مرکز موجبر (Hamachi-2009)

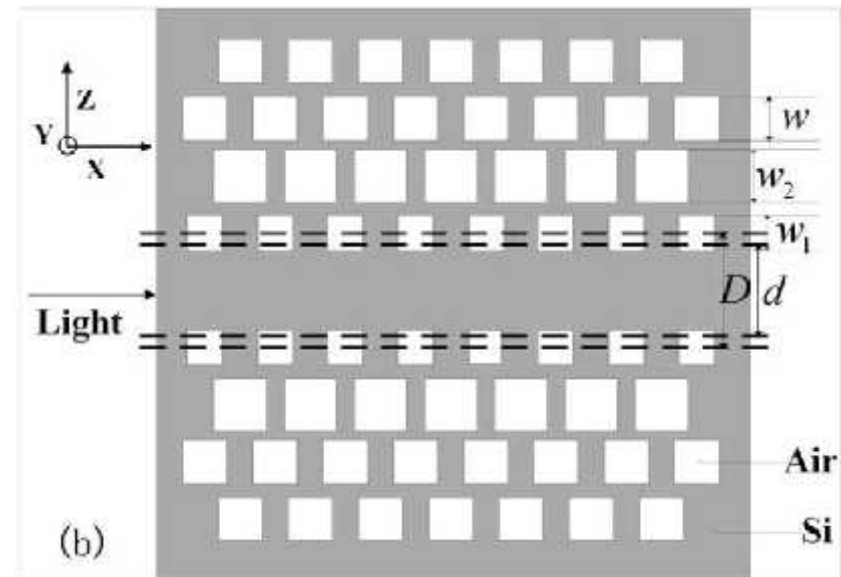
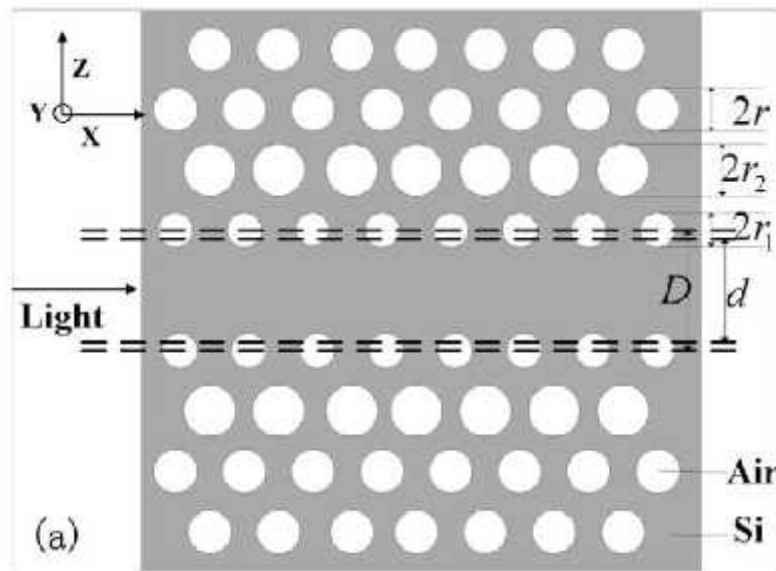
## ۹-۲- روش های مبتنی بر مهندسی پاشیدگی

۱۶- استفاده از حفره های هوای چشم شکل در موجبر بلور فوتونی (Wan-2013)



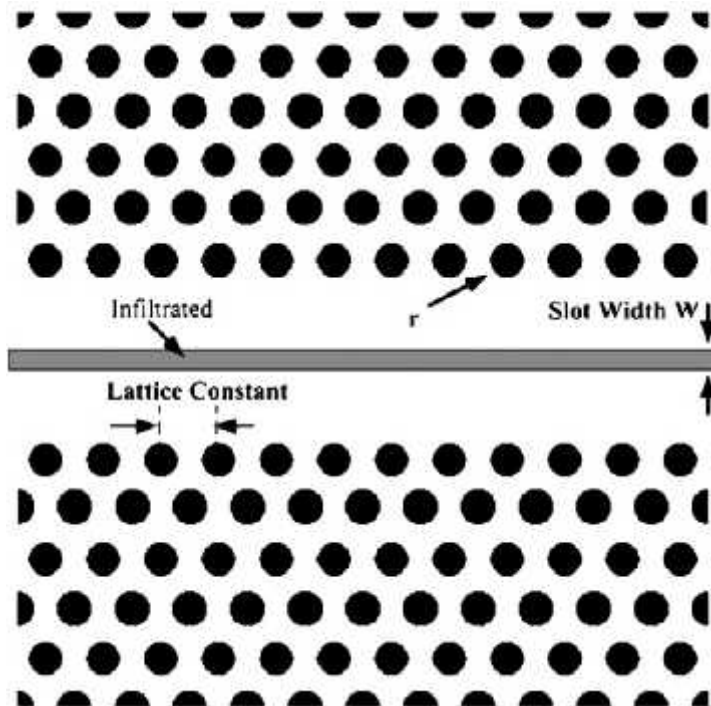
## ۹-۲- روش های مبتنی بر مهندسی پاشیدگی

۱۷- استفاده از موجبر بلور فوتونی با حفره های هوای مربعی و دایروی (Zhang - 2010)

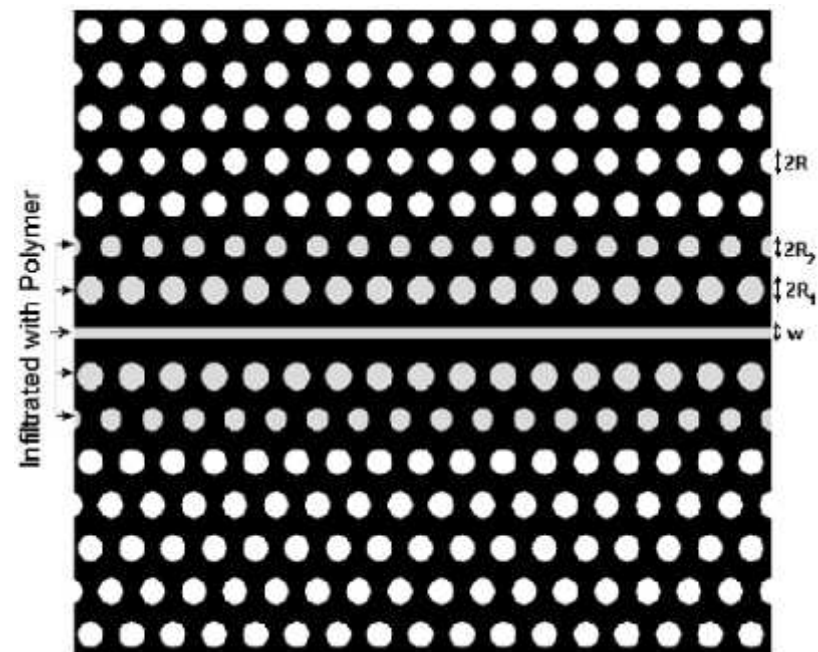


## ۹-۲- روش های مبتنی بر مهندسی پاشیدگی

۱۹- استفاده از موجبر با شکاف و پر کردن شکاف با سیال نوری (Wu-2011)



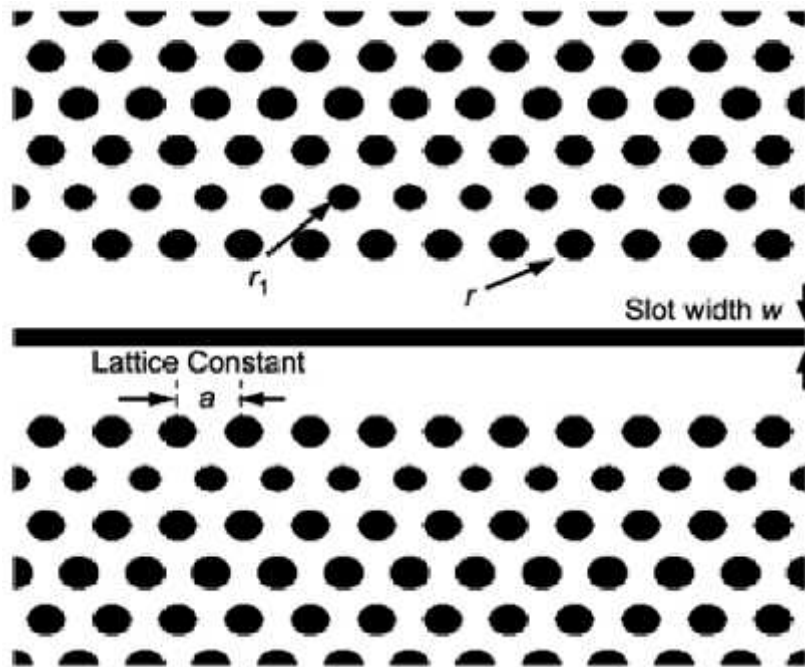
۱۸- استفاده از موجبر با شکاف و سیال نوری (Aghababaeian-2011)



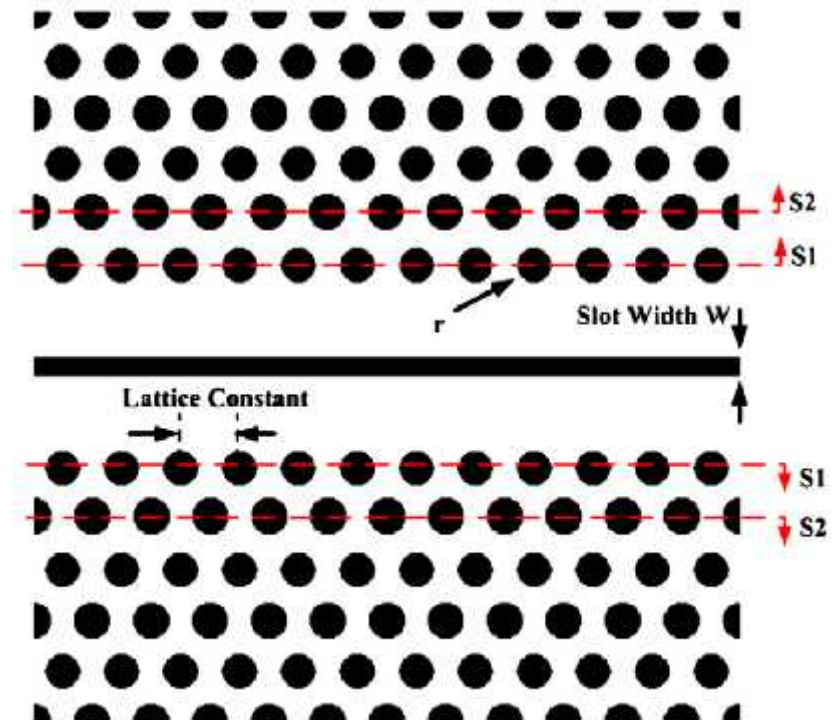


## ۹-۲- روش های مبتنی بر مهندسی پاشیدگی

۲۱- استفاده از موجبر با شکاف و تغییر اندازه ردیف دوم حفره های هوای نزدیک مرکز موجبر  
(Jun-2009)

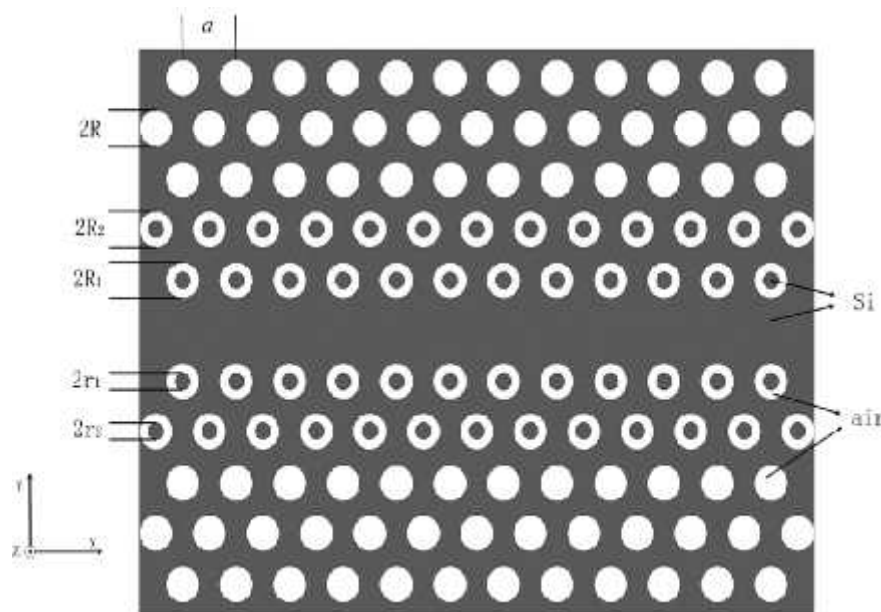


۲۰- استفاده از موجبر با شکاف و جابجایی دو ردیف حفره های هوای نزدیک مرکز موجبر  
(Wu-2010)

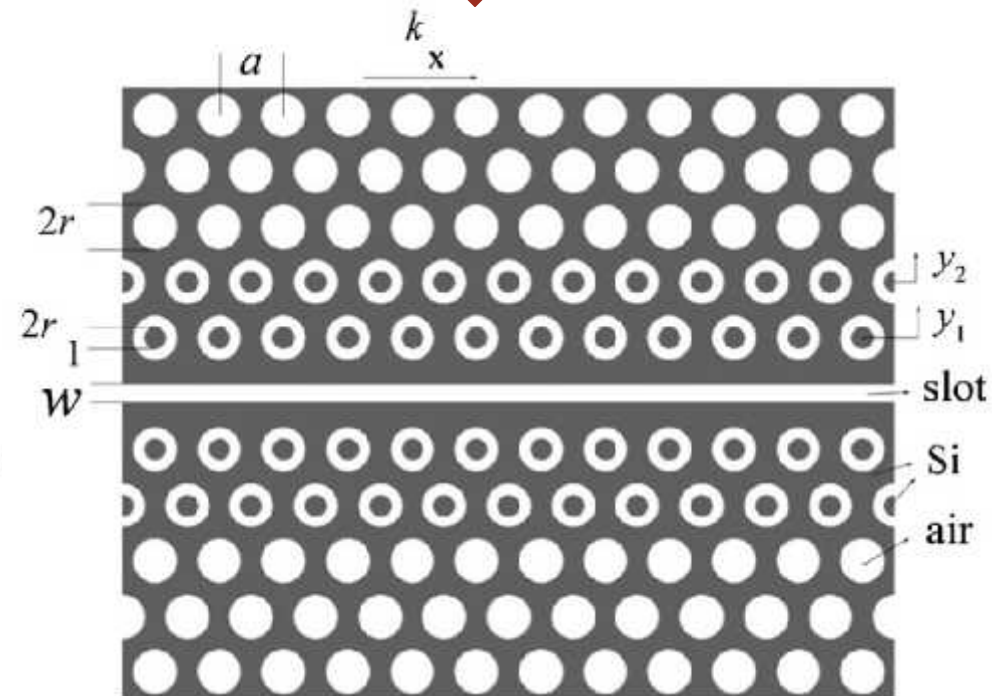


## ۹-۲- روش های مبتنی بر مهندسی پاشیدگی

۲۳- استفاده از حفره های هوای حلقوی شکل در دو ردیف نزدیک مرکز موجبر (Zhai-2011)



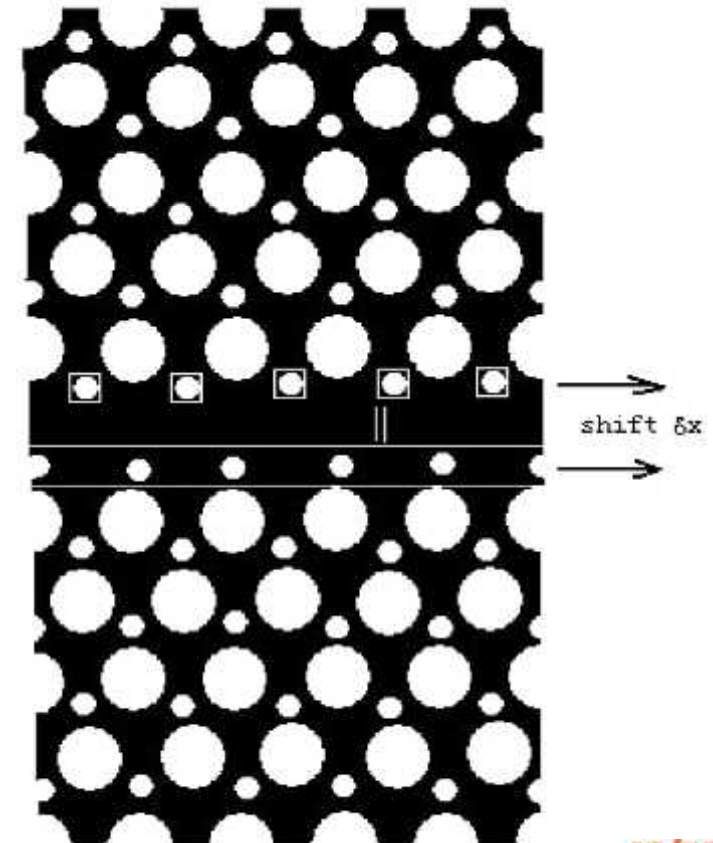
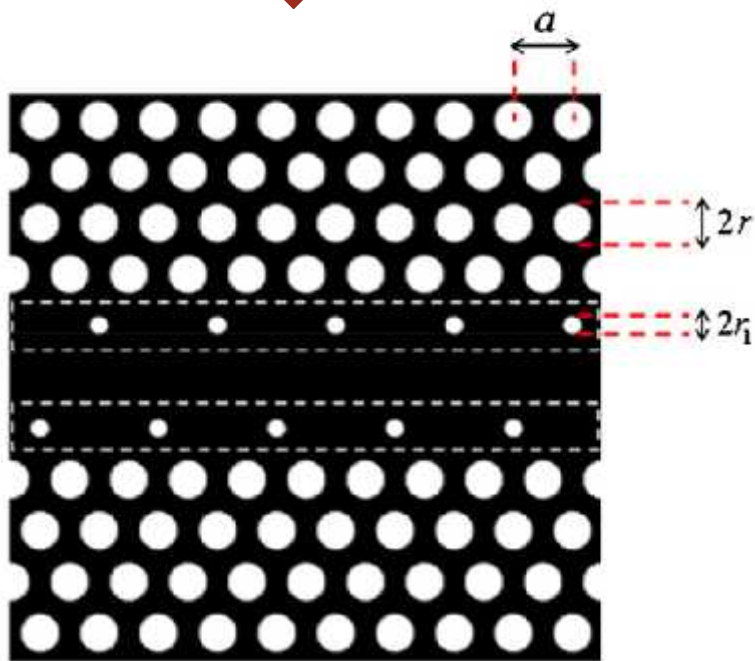
۲۲- استفاده از موجبر با شکاف و حفره های هوای حلقوی شکل در دو ردیف نزدیک مرکز موجبر (Zhu-2013)



## ۹-۲- روش های مبتنی بر مهندسی پاشیدگی

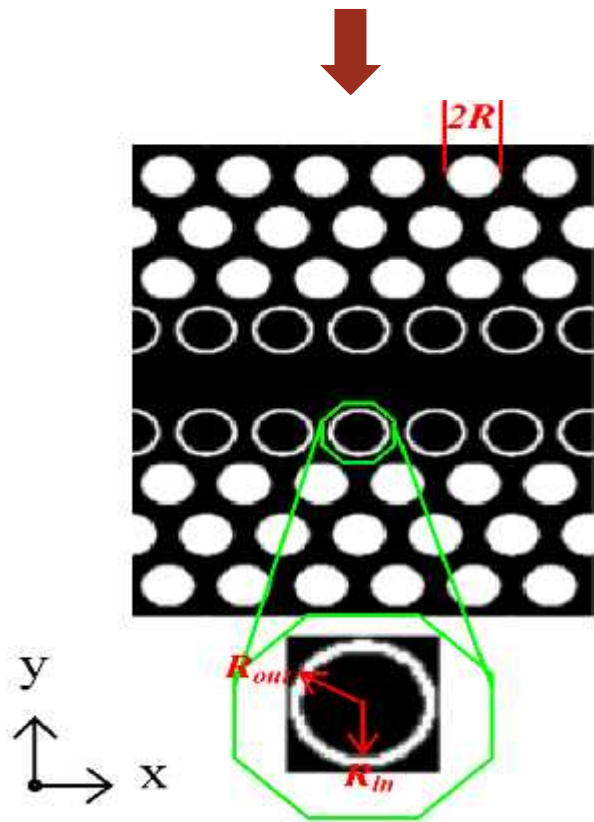
۲۴- تغییر اندازه حفره های هوا موجبر بلور فوتونی  
(Mao-2010)

۲۵- تغییر اندازه حفره های هوا ردیف اول نزدیک به مرکز موجبر بلور فوتونی (Lotfi-2012)

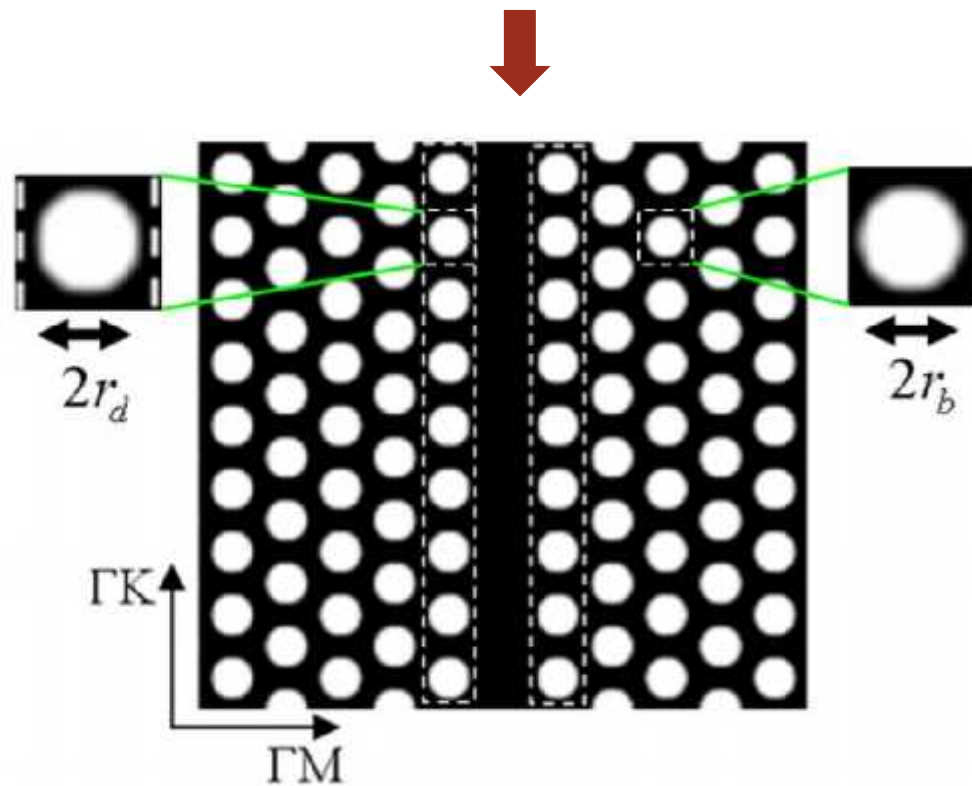


## ۹-۲- روش های مبتنی بر مهندسی پاشیدگی

۲۷- استفاده از حفره های هوای حلقوی شکل در ردیف اول نزدیک به مرکز موجبر (Dai-2009)

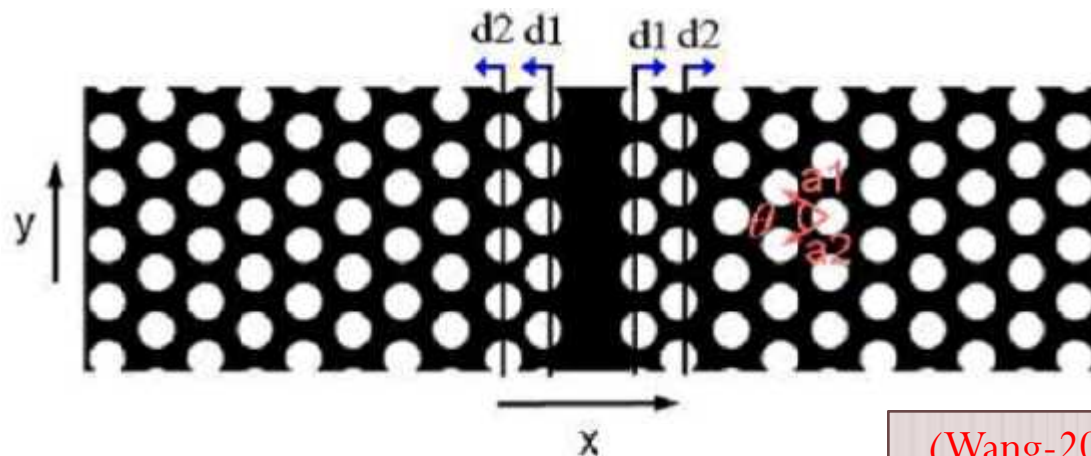


۲۶- تغییر اندازه حفره های هوا ردیف اول نزدیک به مرکز موجبر بلور فوتونی (Kurt-2010)

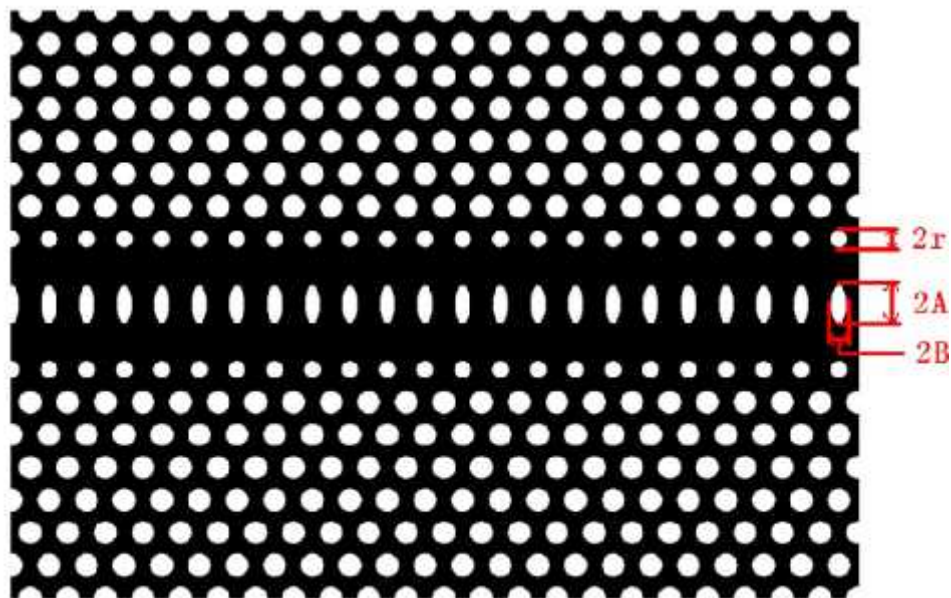


## ۹-۲- روش های مبتنی بر مهندسی پاشیدگی

۲۸- استفاده از موجبر بلور فوتونی با شبکه ی مایل (Leng-2010)

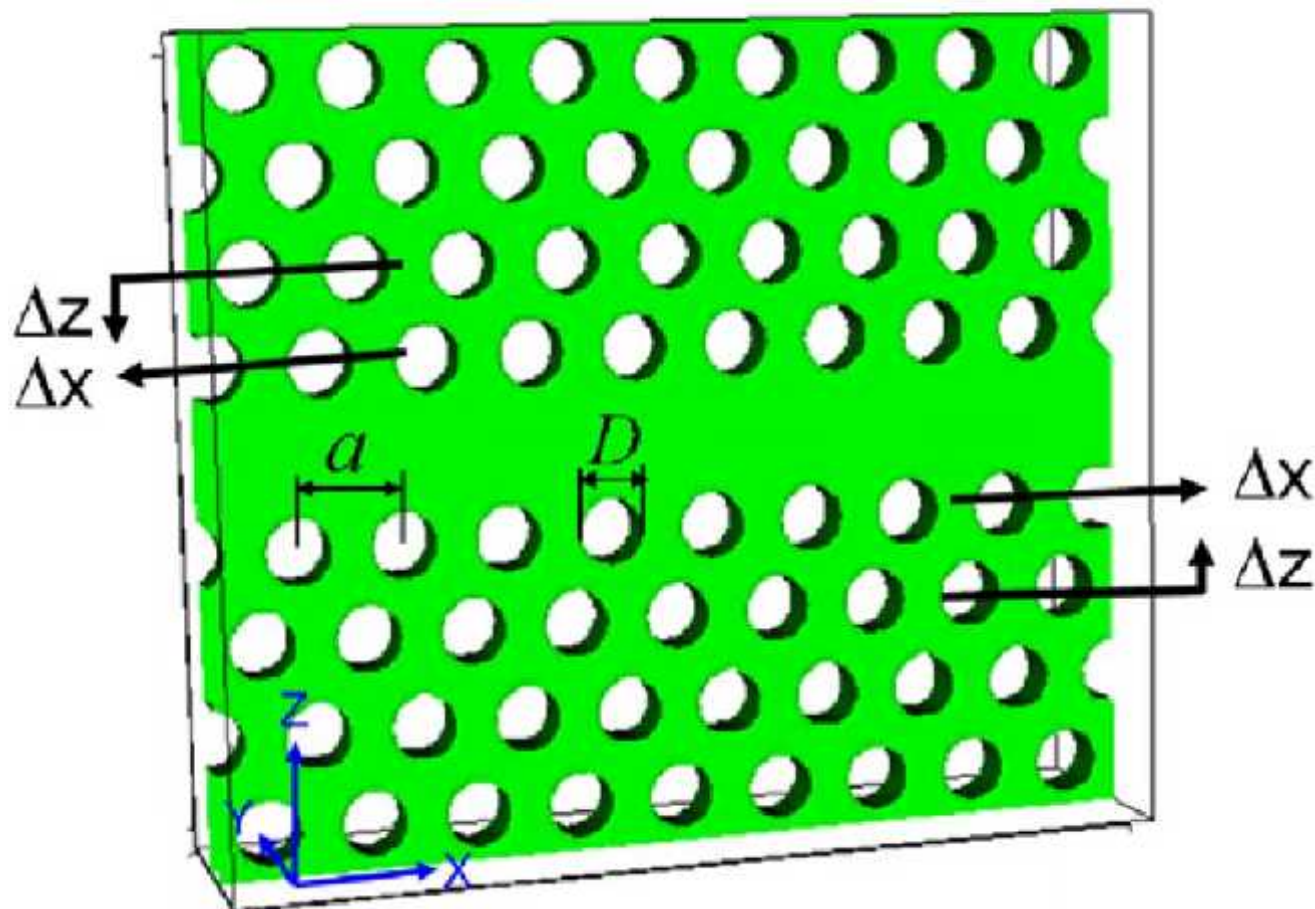


۲۹- تغییر شکل حفره های هوای موجبر (Wang-2008)



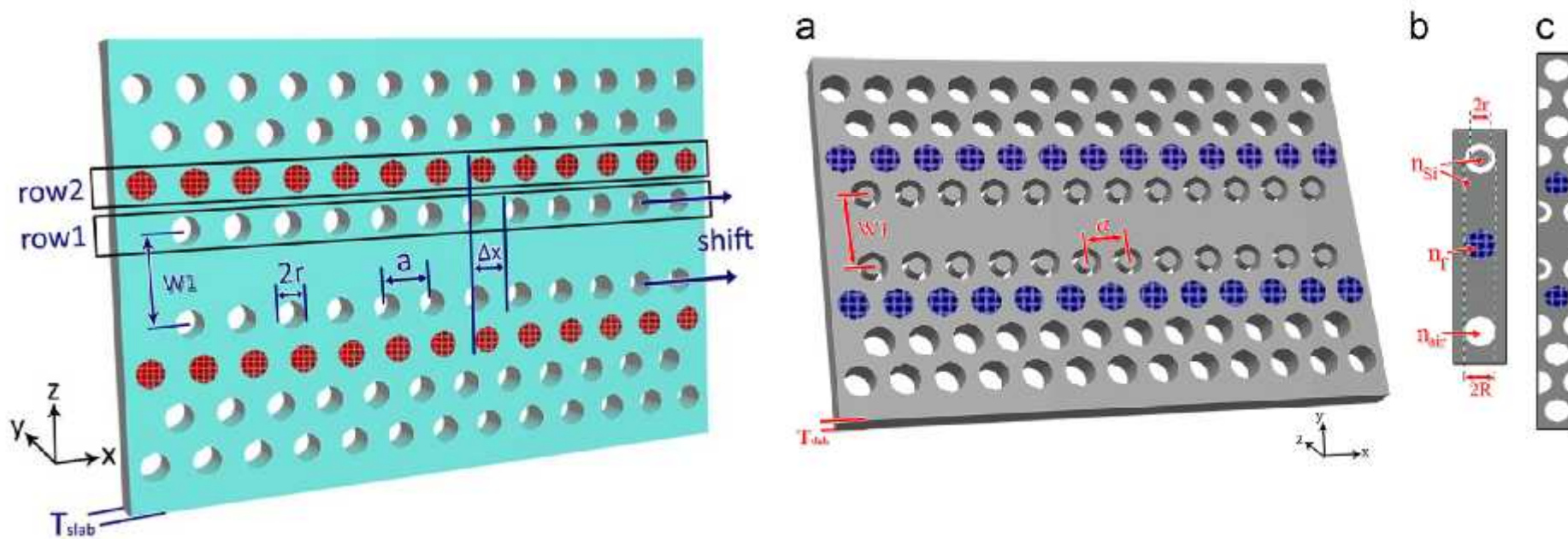
## ۹-۲- روش های مبتنی بر مهندسی پاشیدگی

۳۰- تغییر مکان حفره های هوا دو ردیف نزدیک به مرکز موجبر (Liang-2011)



## ۹-۲- روش های مبتنی بر مهندسی پاشیدگی

۳۱- تغییر مکان حفره های هوا و تزریق سیال نوری (janfaza&mansouri-2013)



## ۹-۲- روش های مبتنی بر مهندسی پاشیدگی

سال ارایه	پهنای باند	ضریب شکست گروه ( $n_g$ )	نوع روش	نویسنده
۲۰۰۶	۲/۵THz	۲۵	تغییر عرض	Krauss و همکاران
۲۰۰۶	۹ nm	۶۰	تغییر اندازه حفره ها	Borel و همکاران
۲۰۰۸	۱۱ nm	۴۴	تغییر مکان حفره ها	Krauss و همکاران
۲۰۰۷	۸ nm	۳۷	حفره های حلقوی شکل	Lipsanen و همکاران
۲۰۰۸	۴۰GHz	۵۰	موجبر نامتقارن	Ma و همکاران
۲۰۱۲	۲۳/۷ nm	۳۵	تغییر شکل حفره ها (هلالی شکل)	Meng و همکاران
۲۰۱۳	۱۶/۶ nm	۳۷	تغییر شکل حفره ها (بیضوی شکل)	Xu و همکاران
۲۰۰۹	۳۰ nm	۲۰	تزریق سیال نوری	ابن علی و همکاران
۲۰۱۲	۶/۸ nm	۴۱	موجبر با شکاف	Wang و همکاران



## ۹-۲- روش های مبتنی بر مهندسی پاشیدگی

سال ارایه	پهنای باند	ضریب شکست گروه ( $n_g$ )	نوع روش	نویسنده
۲۰۱۰	۲/۵THz	۲۵	استفاده از حفره های بیضوی شکل	Long و همکاران
۲۰۱۱	۹ nm	۶۰	استفاده از حفره های بیضوی شکل	Shen و همکاران
۲۰۱۰	۱۱ nm	۴۴	تزریق سیال نوری در Cladding پایین	Lü و همکاران
۲۰۰۹	۸ nm	۳۷	حفره های حلقوی شکل	Hou و همکاران
۲۰۱۰	۴۰GHz	۵۰	تغییر مکان حفره ها	Hao و همکاران
۲۰۰۹	۲۳/۷ nm	۳۵	تغییر مکان حفره ها	Hamachi و همکاران
۲۰۱۳	۱۶/۶ nm	۳۷	تغییر شکل حفره ها (چشم شکل)	Wan و همکاران
۲۰۱۰	۳۰ nm	۲۰	استفاده از شبکه ی مربعی شکل	Zhang و همکاران
۲۰۱۱	۶/۸ nm	۴۱	استفاده از موجبر با شکاف و سیال نوری	Aghababaeian و همکاران

## ۹-۲- روش های مبتنی بر مهندسی پاشیدگی

سال ارایه	پهنای باند	ضریب شکست گروه ( $n_g$ )	نوع روش	نویسنده
۲۰۱۱	۲/۵THz	۲۵	استفاده از موجبر با شکاف و سیال نوری	Wu و همکاران
۲۰۱۰	۹ nm	۶۰	استفاده از موجبر با شکاف و تغییر مکان حفره ها	Wu و همکاران
۲۰۰۹	۱۱ nm	۴۴	استفاده از موجبر با شکاف و تغییر اندازه حفره ها	Jun و همکاران
۲۰۱۳	۸ nm	۳۷	استفاده از موجبر با شکاف و حفره های حلقوی شکل	Zhu و همکاران
۲۰۱۱	۴۰ GHz	۵۰	حفره های حلقوی شکل	Zhai و همکاران
۲۰۱۰	۲۳/۷ nm	۳۵	تغییر اندازه حفره ها	Mao و همکاران
۲۰۱۲	۱۶/۶ nm	۳۷	تغییر اندازه حفره ها	Lotfi و همکاران
۲۰۱۰	۳۰ nm	۲۰	تغییر اندازه حفره ها	Kurt و همکاران
۲۰۰۹	۶/۸ nm	۴۱	حفره های حلقوی شکل	Dai و همکاران

## ۹-۲- روش های مبتنی بر مهندسی پاشیدگی

سال ارایه	پهنای باند	ضریب شکست گروه ( $n_g$ )	نوع روش	نویسنده
۲۰۱۰	۲/۵THz	۲۵	موجبر بلور فوتونی با شبکه ی مایل	Leng و همکاران
۲۰۰۸	۹ nm	۶۰	تغییر شکل حفره ها	Wang و همکاران
۲۰۱۱	۱۱ nm	۴۴	تغییر مکان حفره ها	Liang و همکاران

- [1] M. D. Settle, R. J. P. Engelen, M. Salib, A. Michaeli, L. Kuipers, and T. F. Krauss, **Flatband slow light in photonic crystals featuring spatial pulse compression and terahertz bandwidth**, Optics Express, Vol. 15, No. 1, pp. 219-226, 2007.
- [2] L. H. Frandsen, A. Lavrinenko, J. Fage-Pedersen, and P. I. Borel, **Photonic crystal waveguides with semi-slow light and tailored dispersion properties**, Optics Express, Vol. 14, No. 20, pp. 9444-9450, 2006.
- [3] J. Li, T. P. White, L. O'Faolain, A. Gomez-Iglesias, and T. F. Krauss, **Systematic design of flat band slow light in photonic crystal waveguides**, Optics Express, Vol. 16, No. 9, pp. 6227-6232, 2008.
- [4] A. Säynätjoki, M. Mulo, J. Ahopelto, and H. Lipsanen, **Dispersion engineering of photonic crystal waveguides with ring-shaped holes**, Optics Express, Vol. 15, No. 13, pp. 8323-8328, 2007.
- [5] J. Ma and C. Jiang, **Flatband slow light in asymmetric line-defect photonic crystal waveguide featuring low group velocity and dispersion**, Journal of Quantum Electronics, IEEE, Vol. 44, No. 8, pp. 763-769, 2008.
- [6] B. Meng, L.-l. Wang, W.-q. Huang, X.-f. Li, X. Zhai, and H. Zhang, **Wideband and low dispersion slow-light waveguide based on a photonic crystal with crescent-shaped air holes**, Applied Optics, Vol. 51, No. 23, pp. 5735-5742, 2012.
- [7] Y. Xu, L. Xiang, E. Cassan, D. Gao, and X. Zhang, **Slow light in an alternative row of ellipse-hole photonic crystal waveguide**, Applied Optics, vol. 52, No. 6, pp. 1155-1160, 2013.
- [8] M. Ebnali-Heidari, C. Grillet, C. Monat, and B. Eggleton, **Dispersion engineering of slow light photonic crystal waveguides using microfluidic infiltration**, Optics Express, Vol. 17, No. 3, pp. 1628-1635, 2009.
- [9] Y. Zhao, Y.-N. Zhang, D. Wu, and Q. Wang, **Wideband Slow Light With Large Group Index and Low Dispersion in Slotted Photonic Crystal Waveguide**, Journal of Lightwave Technology, Vol. 30, No. 17, pp. 2812-2817, 2012.

## فهرست مراجع

- [10] A. Y. Petrov and M. Eich, Zero dispersion at small group velocities in photonic crystal waveguides, *Applied physics letters*, Vol. 85, No. 21, pp. 4866-4868, 2004.
- [11] S. Kubo, D. Mori, and T. Baba, Low-group-velocity and low-dispersion slow light in photonic crystal waveguides, *Optics letters*, Vol. 32, No. 20, pp. 2981-2983, 2007.
- [12] H. Kurt, K. Üstün, and L. Ayas, Study of different spectral regions and delay bandwidth relation in slow light photonic crystal waveguides, *Optics Express*, Vol. 18, No. 26, pp. 26965-26977, 2010.
- [13] J. Li, T. P. White, L. O'Faolain, A. Gomez-Iglesias, and T. F. Krauss, Systematic design of flat band slow light in photonic crystal waveguides, *Optics Express*, Vol. 16, No. 9, pp. 6227-6232, 2008.
- [14] J. Liang, L. Y. Ren, M. J. Yun, and X. J. Wang, Wideband slow light with ultralow dispersion in a W1 photonic crystal waveguide, *Applied Optics*, Vol. 50, No. 31, pp. G98-G103, 2011.
- [15] Y. Hamachi, S. Kubo, and T. Baba, Slow light with low dispersion and nonlinear enhancement in a lattice-shifted photonic crystal waveguide, *Optics letters*, Vol. 34, No. 7, pp. 1072-1074, 2009.
- [16] R. Hao, E. Cassan, X. Le Roux, D. Gao, V. Do Khanh, L. Vivien, D. Marris-Morini, and X. Zhang, Improvement of delay-bandwidth product in photonic crystal slowlight waveguides, *Optics Express*, Vol. 18, No.16, pp. 16309-16319, 2010.
- [17] A. Säynätjoki, M. Mulot, J. Ahopelto, and H. Lipsanen, Dispersion engineering of photonic crystal waveguides with ring-shaped holes, *Optics Express*, Vol. 15, No. 13, pp. 8323-8328, 2007.
- [18] J. Hou, D. Gao, H. Wu, R. Hao, and Z. Zhou Flat band slow light in symmetric line defect photonic crystal waveguides, *Photonics Technology Letters, IEEE*, Vol. 21, No. 20, pp. 1571-1573, 2009.
- [19] Y. Zhai, H. Tian, and Y. Ji, Slow light property improvement and optical buffer capability in ring-shape-hole photonic crystal waveguide, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 29, No. 20, pp. 3083-3090, 2011.
- [20] L. Dai and C. Jiang, Ultrawideband low dispersion slow light waveguides, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 27, No. 14, pp. 2862-2868, 2009.
- [21] J. Ma and C. Jiang, Flatband slow light in asymmetric line-defect photonic crystal waveguide featuring low group velocity and dispersion, *Journal of Quantum Electronics, IEEE*, Vol. 44, No. 8, pp. 763-769, 2008.

## فهرست مراجع

- [22] Y. Wan, K. Fu, C. Li, and M. Yun, Improving slow light effect in photonic crystal line defect waveguide by using eye-shaped scatterers, *Optics Communications*, Vol. 286, pp. 192-196, 2012.
- [23] Y. Xu, L. Xiang, E. Cassan, D. Gao, and X. Zhang, Slow light in an alternative row of ellipse-hole photonic crystal waveguide, *Applied Optics*, vol. 52, No. 6, pp. 1155-1160, 2013.
- [24] B. Meng, L.-l. Wang, W.-q. Huang, X.-f. Li, X. Zhai, and H. Zhang, Wideband and low dispersion slow-light waveguide based on a photonic crystal with crescent-shaped air holes, *Applied Optics*, Vol. 51, No. 23, pp. 5735-5742, 2012.
- [25] F.-C. Leng, W.-Y. Liang, B. Liu, T.-B. Wang, and H.-Z. Wang, Wideband slow light and dispersion control in oblique lattice photonic crystal waveguides, *Optics Express*, Vol. 18, No. 6, pp. 5707-5712, 2010.
- [26] M. Ebnali-Heidari, C. Grillet, C. Monat, and B. Eggleton, Dispersion engineering of slow light photonic crystal waveguides using microfluidic infiltration, *Optics Express*, Vol. 17, No. 3, pp. 1628-1635, 2009.
- [27] S. Lü, J. Zhao, and D. Zhang, Flat band slow light in asymmetric photonic crystal waveguide based on microfluidic infiltration, *Applied Optics*, Vol. 49, No. 20, pp. 3930-3934, 2010.
- [28] J. Wu, Y. Li, C. Peng, and Z. Wang, Numerical demonstration of slow light tuning in slotted photonic crystal waveguide using microfluidic infiltration, *Optics Communications*, Vol. 284, No. 8, pp. 2149-2152, 2011.
- [29] J. Wu, Y. Li, C. Yang, C. Peng, and Z. Wang, Slow light in tapered slot photonic crystal waveguide, *Chinese Science Bulletin*, Vol. 54, No. 20, pp. 3658-3662, 2009.
- [30] K.-T. Zhu, T.-S. Deng, Y. Sun, Q.-F. Zhang, and J.-L. Wu, Slow light property in ring-shape-hole slotted photonic crystal waveguide, *Optics Communications*, Vol. 290, pp. 87-91, 2012.

سپاس از نگاه گرمتان

