

بلورهای فوتونی Photonic Crystals

11. Photonic Crystal Devices فصل ۱۱- ادوات بلور فوتونی

زاهدان - دانشگاه سیستان و بلوچستان - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر -

گروه مهندسی الکترونیک - دکتر محمدعلی منصوری بیرجندی

mansouri@ece.usb.ac.ir

mamansouri@yahoo.com

References

□ Main references

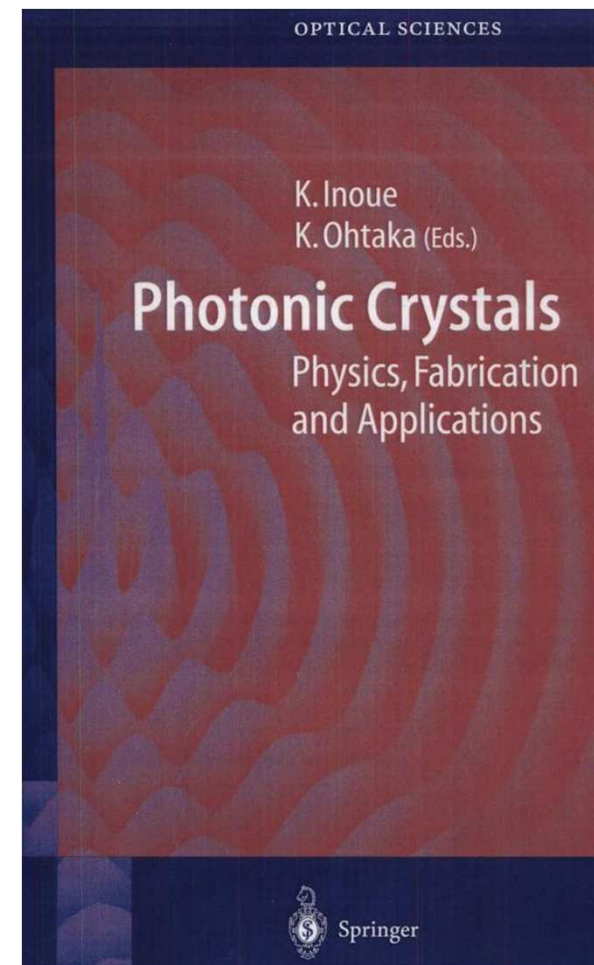
➤ Textbook:

● **Kuon Inoue, and Kazuo Ohtaka**

*Photonics Crystals: Physics,
Fabrication and Applications*

Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004

● **Lecture notes**



Contents: 11. Photonic Crystal Devices

T. Baba

11.1 How to Use Photonic Crystal Properties

11.2 Light Emitters

11.2.1 Point-Defect Laser

11.2.2 Band-Edge Laser

11.2.3 VCSEL

11.2.4 High Extraction Efficiency LED

11.3 Optical Waveguides

11.3.1 Line-Defect Waveguide in a Photonic Crystal Slab

11.3.2 Other Types of Waveguide

11.4 Optical Fibers

11.4.1 Holey Fiber

11.4.2 Photonic Band-Gap Fiber

11.4.3 Bragg Fiber

11.5 Wavelength Filters

11.5.1 Resonant Type Filter

11.5.2 Diffraction Type Filter

11.6 Polarization Filters

11.7 Dispersion Compensators

11.8 Light Control Devices

11.9 Harmonic Generation

فصل ۱۱: ادوات بلور فوتونی

۱۱-۱- چگونگی کاربرد خصوصیات بلورهای فوتونی

۱۱-۲- گسیل کننده های نوری

۱۱-۲-۱- لیزر نقص نقطه ای

۱۱-۲-۲- لیزر لبه ی باند

۱۱-۲-۳- VCSEL

۱۱-۲-۴- LED با راندمان خروجی زیاد

۱۱-۳- موجبرهای نوری

۱۱-۳-۱- موجبر نقص خطی در یک بلور فوتونی تیغه ای

۱۱-۳-۲- انواع دیگر موجبر

ادامه فصل ۱۱: ادوات بلور فوتونی

۱۱-۴- فیبرهای نوری

۱۱-۴-۱- فیبر توخالی

۱۱-۴-۲- فیبر با شکاف باند فوتونی

۱۱-۴-۳- فیبر براگ

۱۱-۵- فیلترهای طول موج

۱۱-۵-۱- فیلتر نوع تشدید شده ، فیلتر نوع کوپلر جهتی

۱۱-۵-۲- فیلتر نوع پراش

۱۱-۶- فیلترهای قطبش

۱۱-۷- جبران کننده های پاشندگی

۱۱-۸- ادوات کنترل کننده نوری

۱۱-۹- تولید هارمونیک

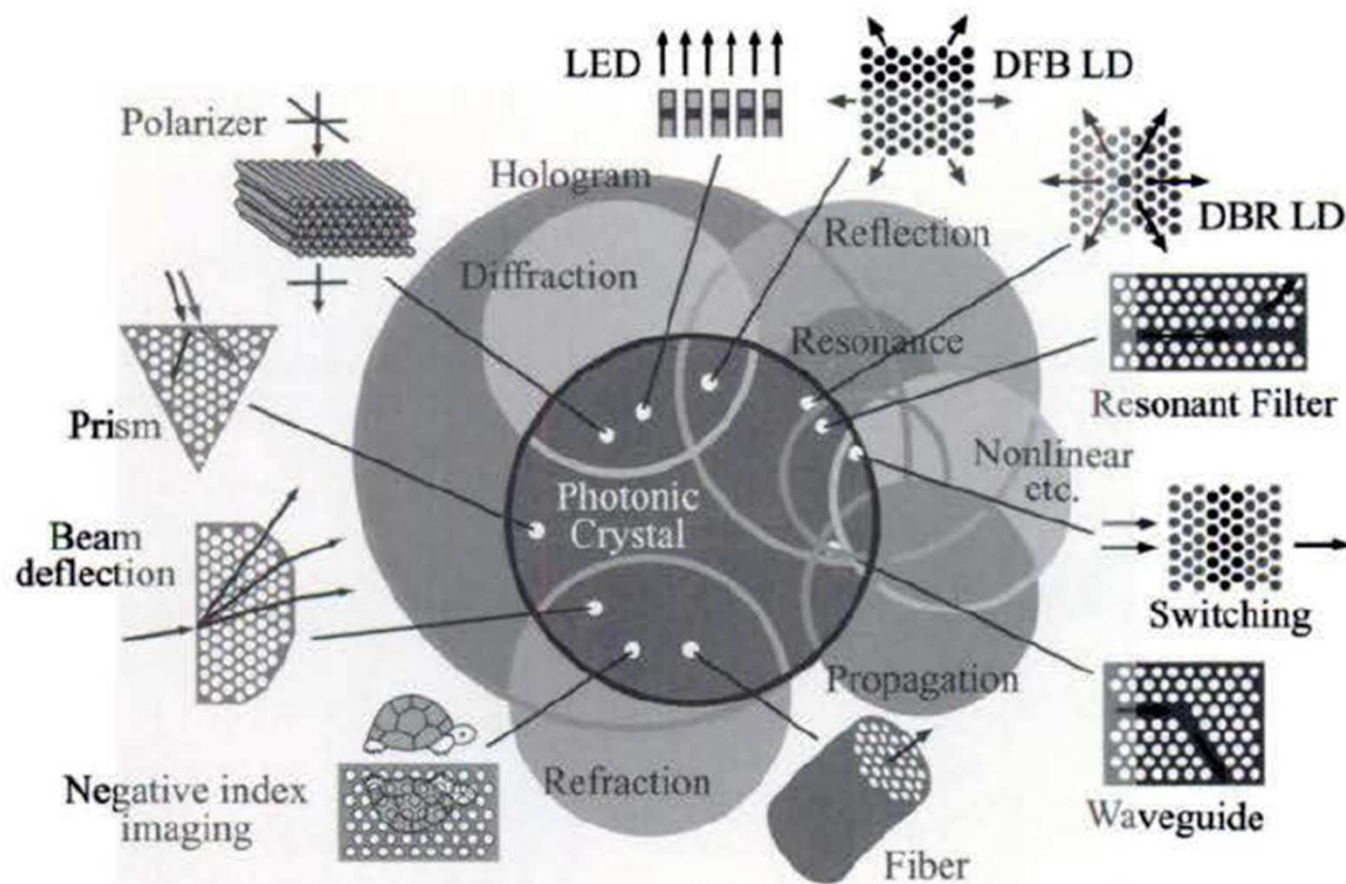
مقدمه: ادوات بلور فوتونی

❖ در این قسمت به طور اساسی **خارج از مسائل فیزیکی** بحث می کنیم.

❖ **بلورهای فوتونی** به عنوان یک **تکنولوژی کلیدی** در عصر بعد از الکترونیک **نوری** گسترش یافته است.

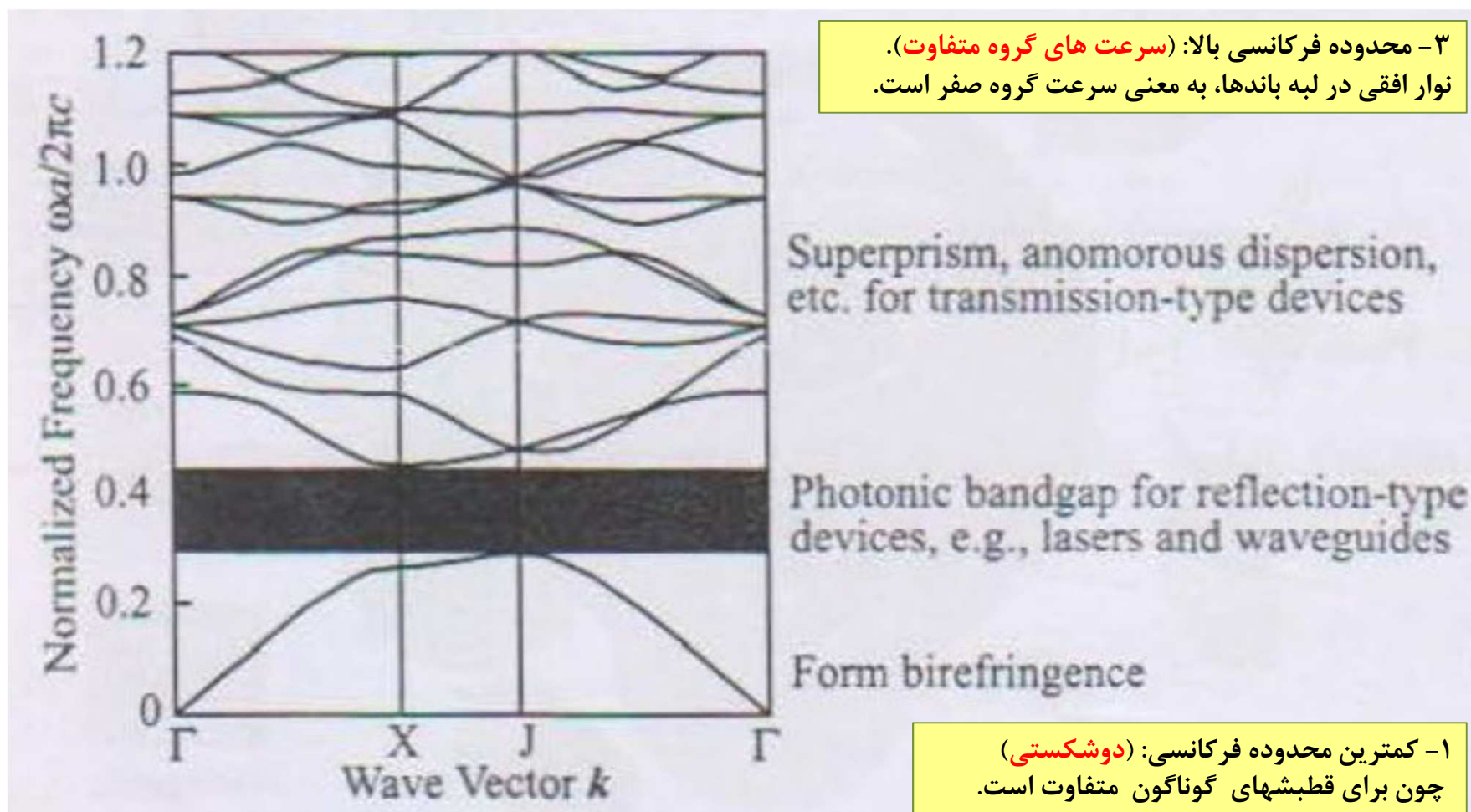
❖ ابتدا در مورد **اصول**، **ویژگی ها** و **جنبه های مختلف** ادوات بلور فوتونی بحث می شود.

۱۱-۱- چگونه کاربرد خصوصیات بلور فوتونی

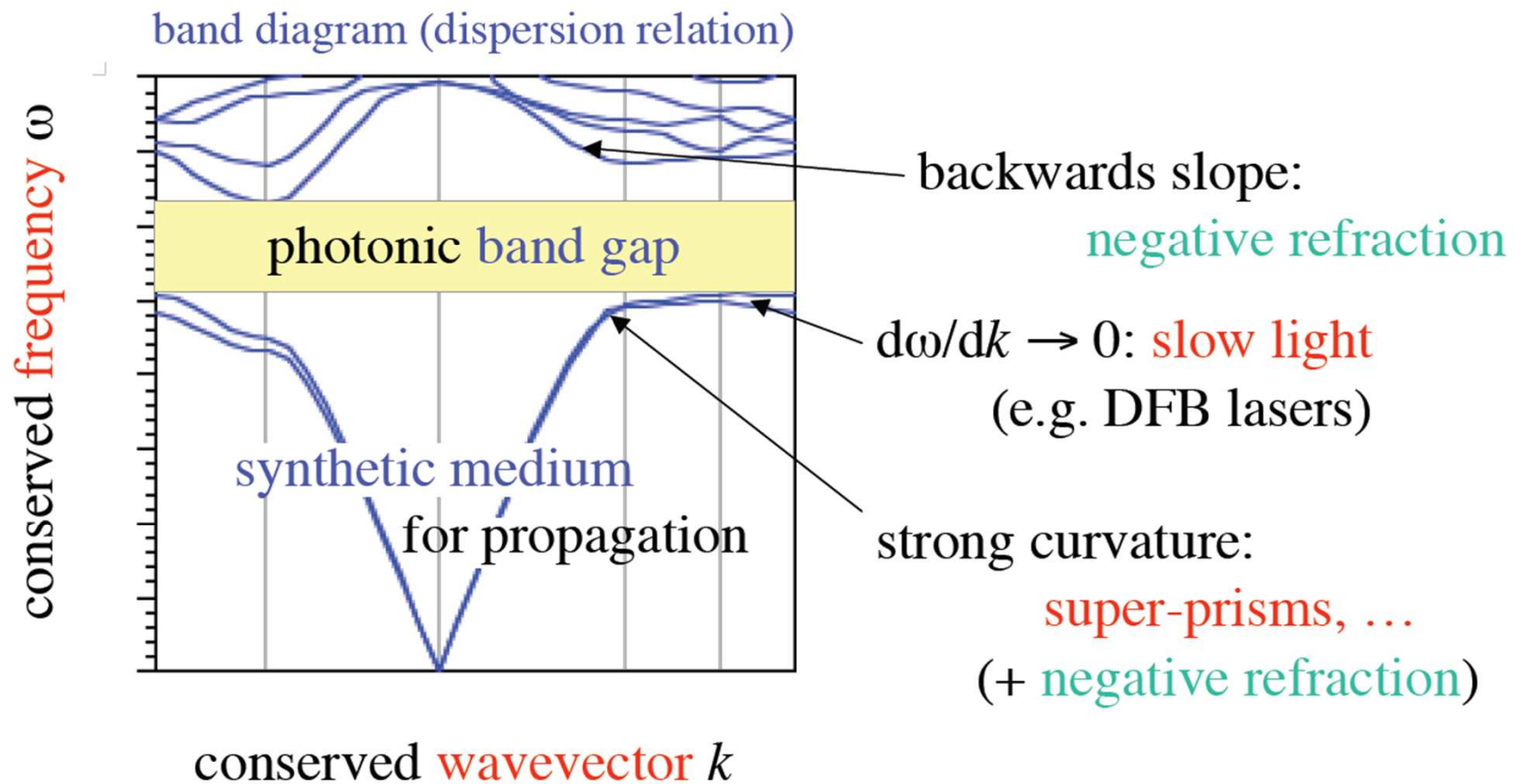


شکل ۱۱-۱ اپتیک بلور فوتونی: رابطه بلور فوتونی با سایر ادوات نوری و کاربردهای مختلف آن

شکل ۱۱-۲ – دیاگرام باند فوتونی برای یک بلور فوتونی دو بعدی از حفره‌ها در یک شبکه‌ی مثلثی و سه محدوده فرکانسی برای اهداف کاربردی مختلف



دیاگرام باند فوتونی برای یک بلور فوتونی دو بعدی نمونه و سه محدوده فرکانسی
برای اهداف کاربردی مختلف



۵-۲- گسیل کننده های نور

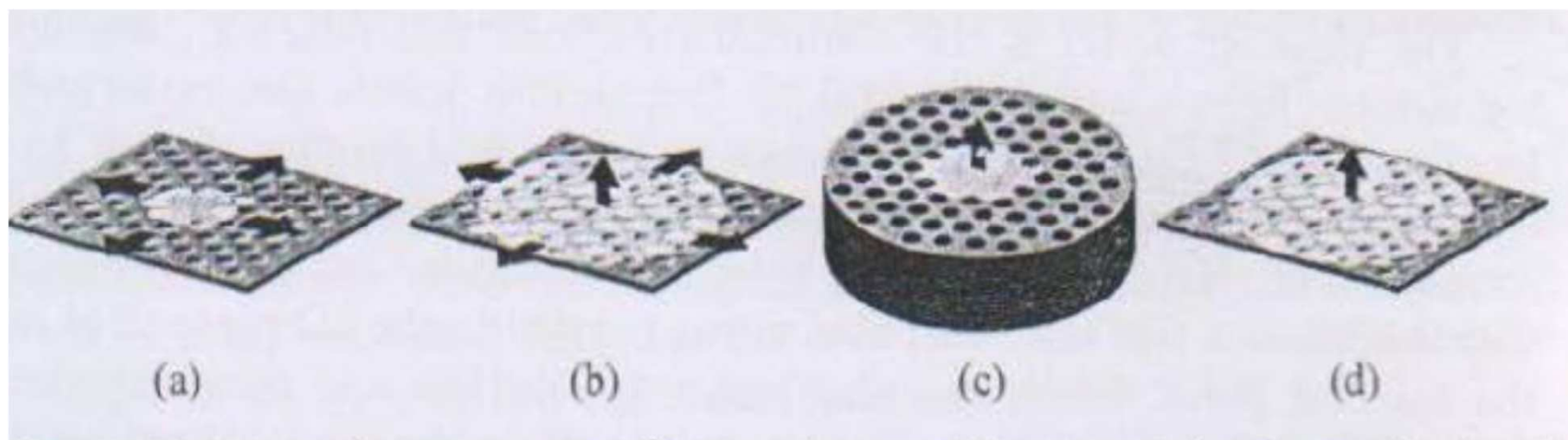


Fig. 11.3. Four photonic crystal **light emitters**:

- (a) point-defect laser;
- (b) band-edge laser;
- (c) VCSEL;
- (d) light-emitting diode

11.2.1 Point-Defect Laser

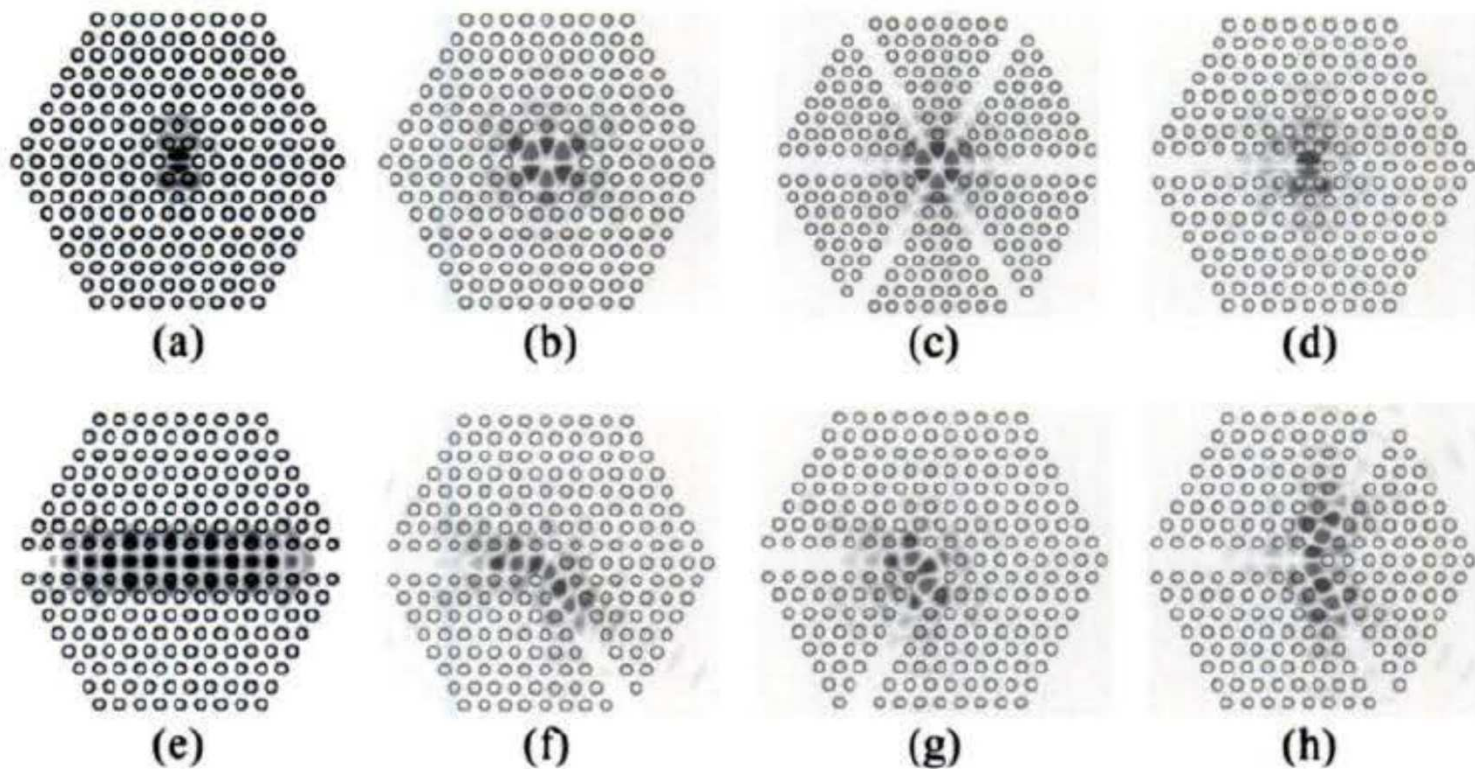
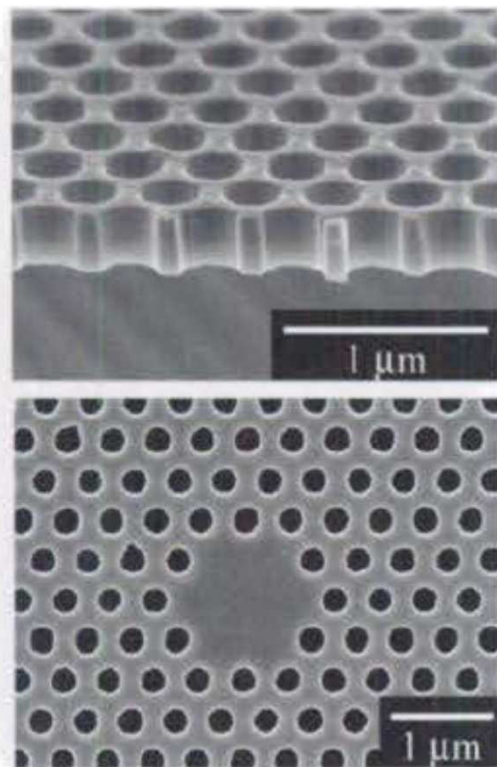


Fig. 11.4. Localized **modes** at **various defects** in a 2D photonic crystal of triangular lattice holes. The modes were calculated by the FDTD method.

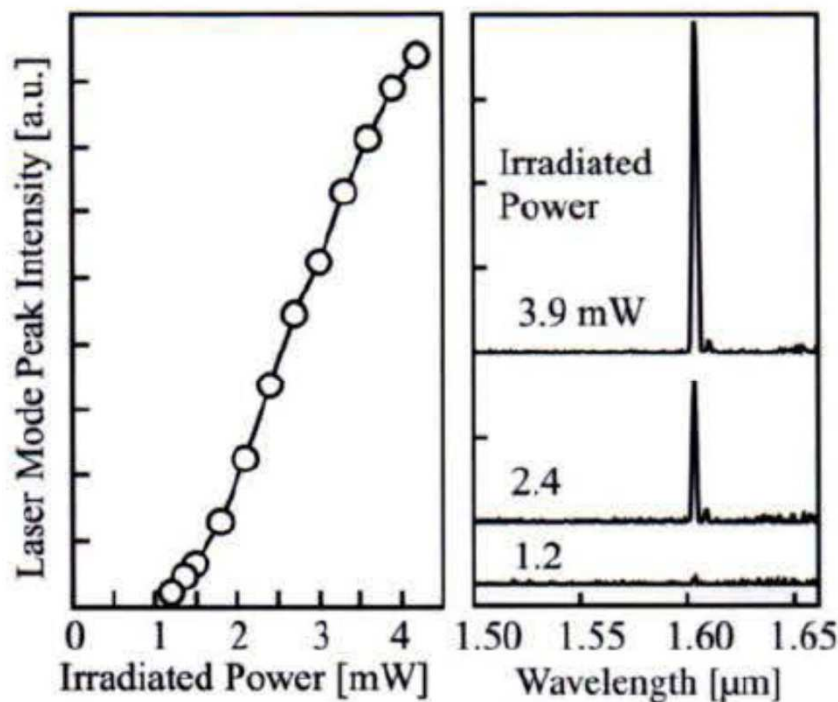
Fig. 11.5. Fabricated photonic crystal laser and lasing characteristics:

(a) SEM of a *GaInAsP* photonic crystal slab and point-defect cavity;

(b) room temperature **lasing** characteristics observed by pulsed photo-pumping.



(a)



(b)

دلایل استفاده زیاد از
GaInAsP:

۱- گسیل با طول موج
بیشتر از $1\mu\text{m}$ ، که برای
فیبر سیلیکن در
مخابرات نوری مناسب
است،

۲- بکارگیری تکنولوژی
اپیتاکسی که به حد
کمال رسیده.

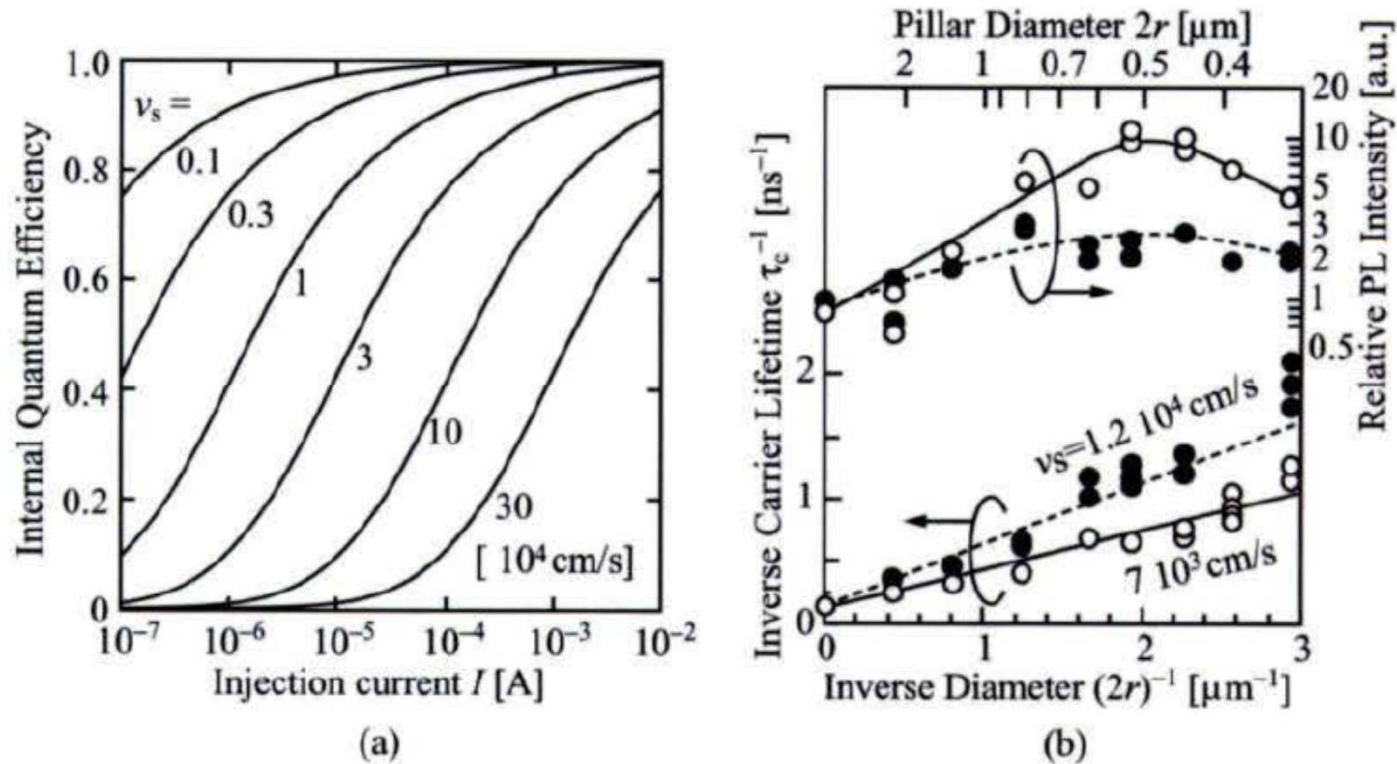
۳- سرعت بازترکیب
سطحی V_s پایین است.

❖ تابش پلاسما، V_s را در یک *GaInAsP* به مقدار $7 \times 10^3 \text{ cm/s}$ کاهش میدهد. برای این منظور، بررسی مواد دیگر از قبیل *GaN*، که ممکن است V_s کمتری داشته باشند، مهم است.

Fig. 11.6. Influence of **surface recombination** on **light emission** characteristics:

- (a) theoretical estimation of internal quantum efficiency with injection current for a pillar-type semiconductor photonic crystal;
- (b) experimental results of carrier **lifetime** and photoluminescence **intensity** in a **GaInAsP/InP pillar-type 2D** photonic crystal.

Closed circles and dotted lines indicate as-formed structures, while open circles and solid lines indicate those after **CH₄ plasma irradiation**.



11.2.2 Band-Edge Laser

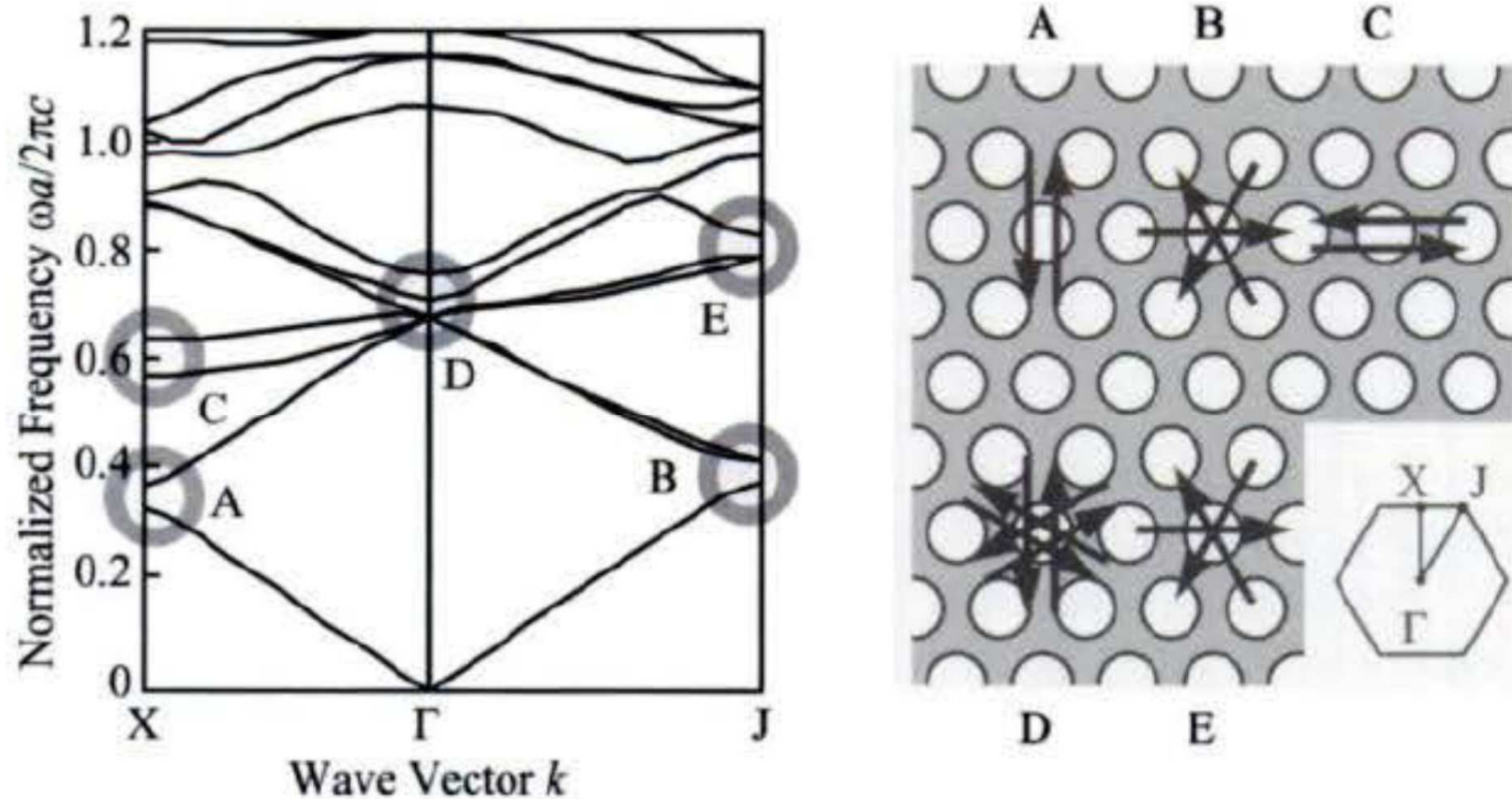
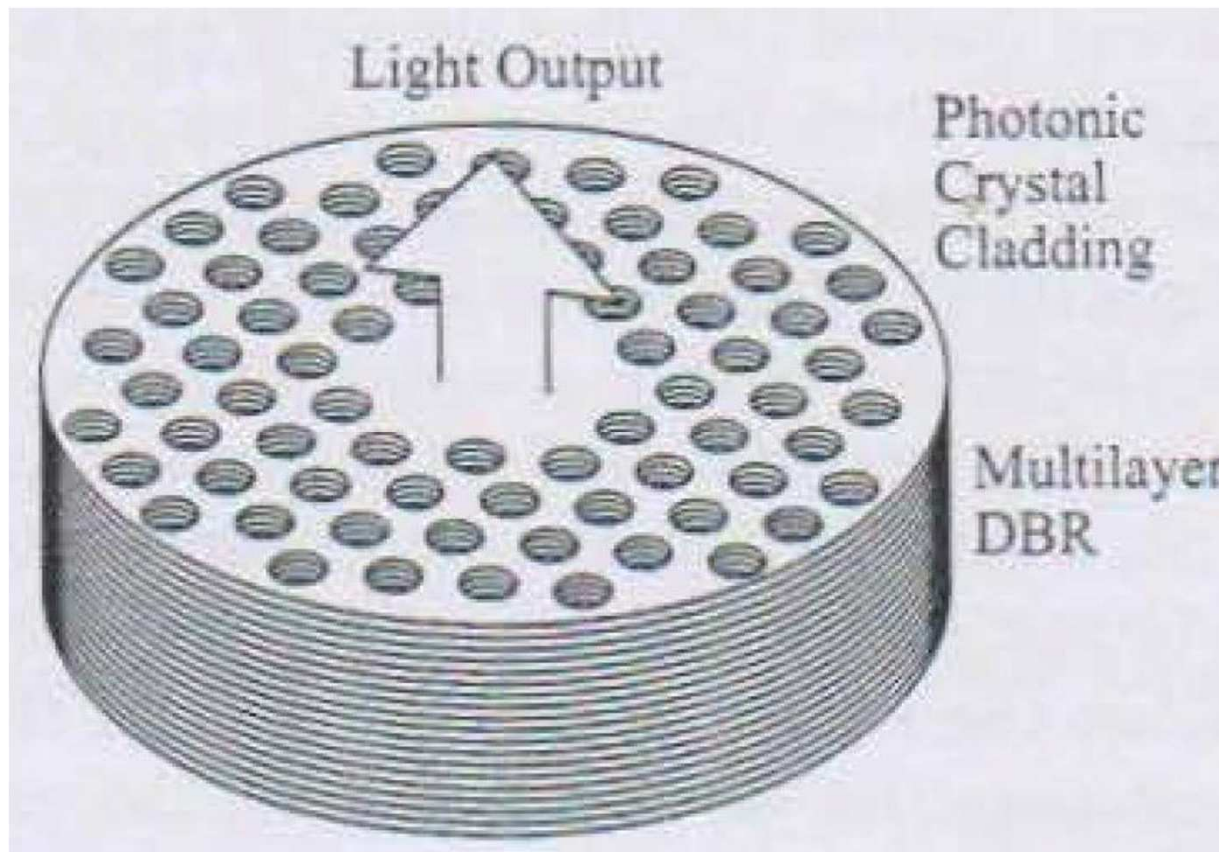


Fig. 11.7. Photonic band diagram for a **2D** photonic crystal and schematic of **optical feedback** at various **band edges**.

11.2.3 VCSEL



❖ لیزر VCSEL یک لیزر میکروکاوک است که باعث دسترسی به فیدبک نوری در یک کریستال یک بعدی می شود، یعنی، یک چینش چندلایه ی نیمه هادی.

11.8. Schematic illustration achieving a VCSEL by using a fiber

11.2.4 High Extraction Efficiency LED

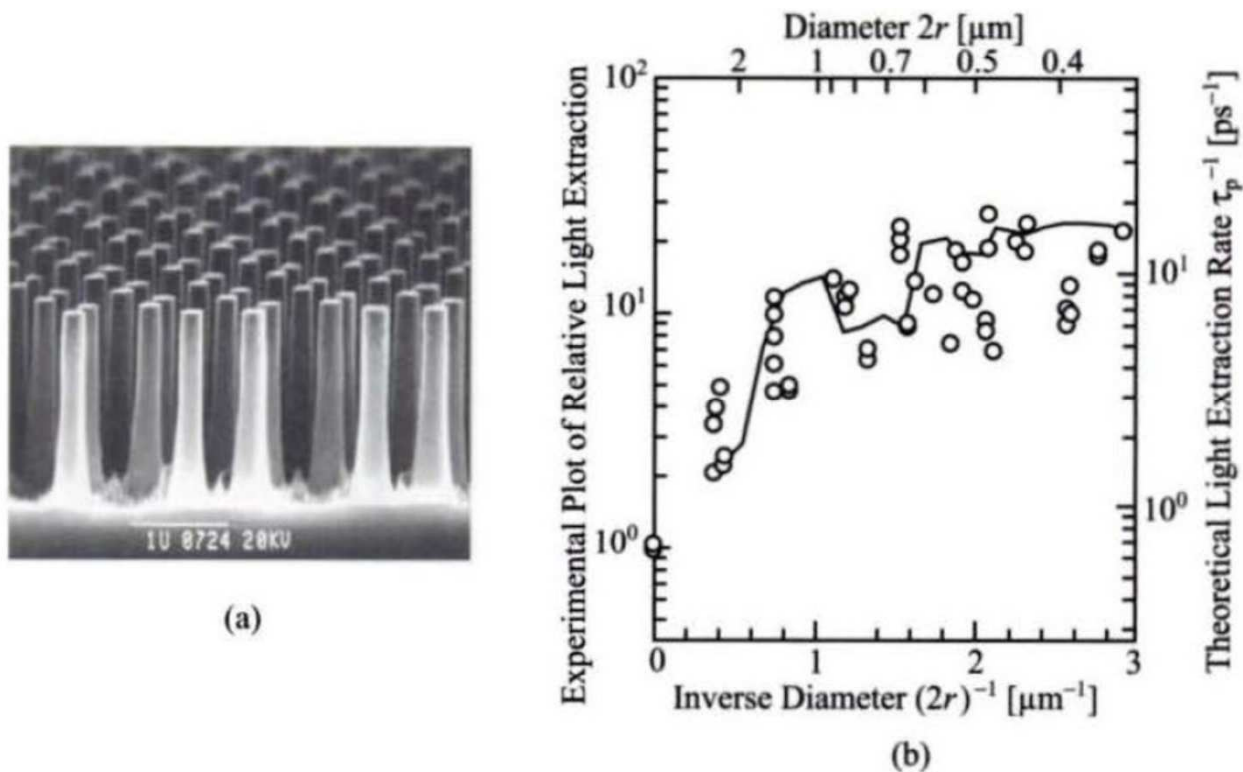


Fig. 11.9. Enhancement of light extraction efficiency measured and calculated for a *GaInAsP/InP* 2D pillar-type photonic crystal

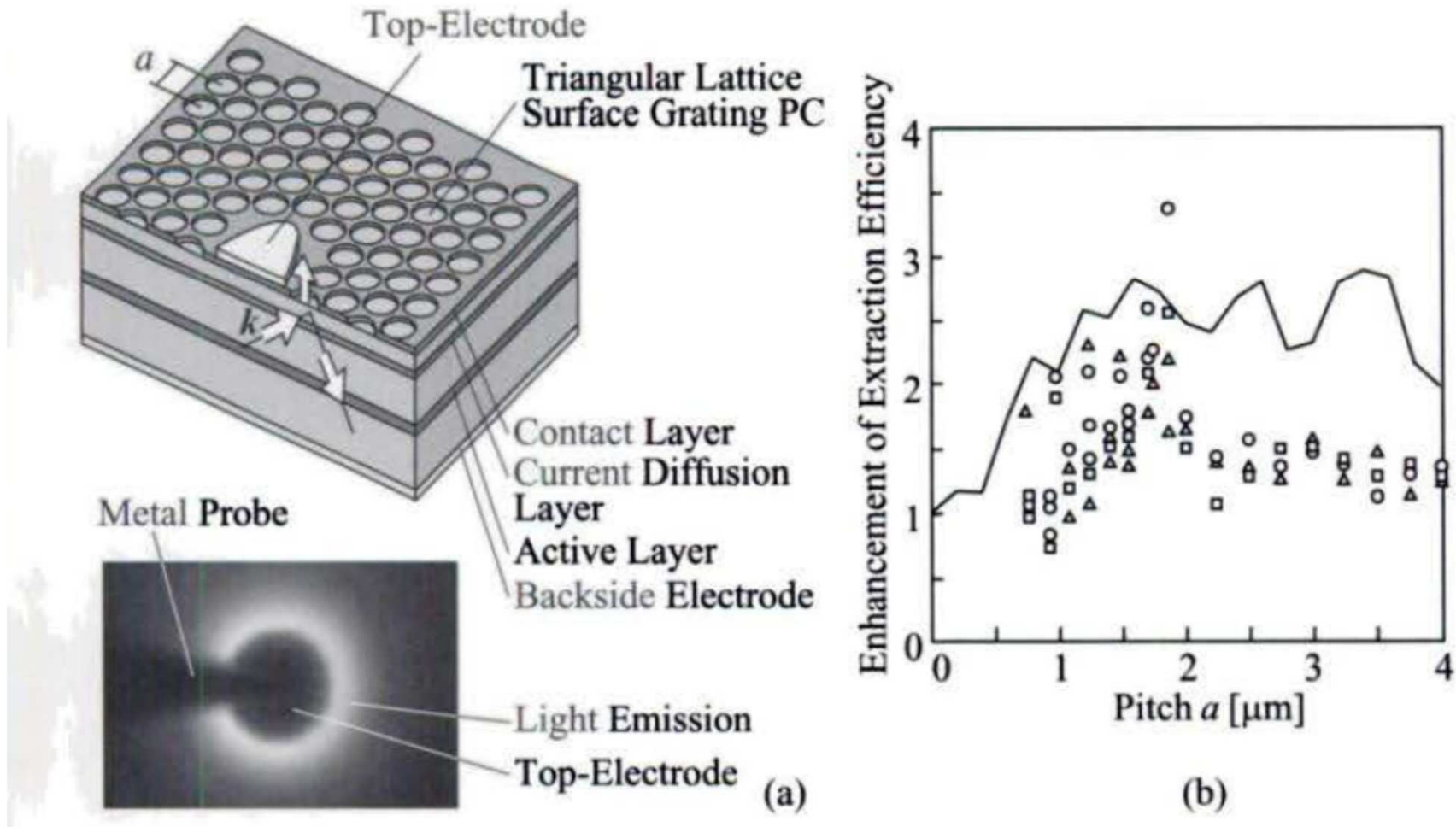
❖ در LEDهای معمولی، راندمان استخراج نور به شدت راندمان کل، کمتر از ۱۰٪ محدود میشود.

❖ بنابراین، اصلاح آن یکی از مسائل مهم برای نمایشگرهای LED و نورافکن‌هایی با نور سفید است.

Fig . 11.10. *GaInAsP/InP* LED structure with *surface grating* 2D photonic crystal:

(a) schematic structure and observed *near-field pattern*;

(b) measured and calculated *enhancement* in *total efficiency* of LED



11.3 Optical Waveguides

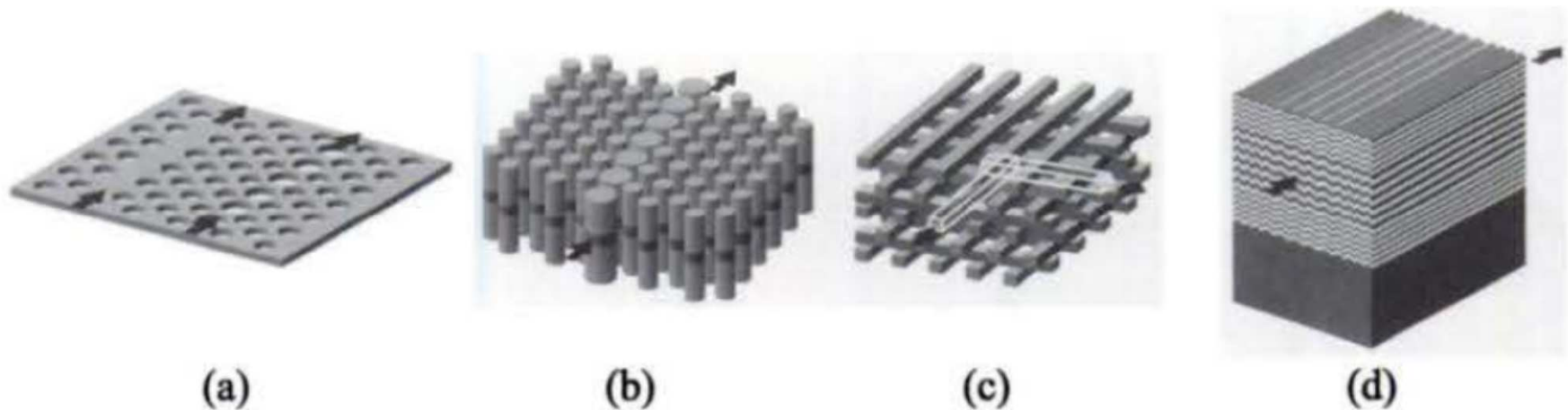


Fig. 11.11. Various *waveguide* structures based on *phc line defects*:

(a) photonic crystal slab type;

(b) pillar type;

(c) 3D wood-pile type;

(d) auto-cloning type

Fig. 11.12. *Near-field patterns* observed from the top of the photonic crystal **slab type waveguide** fabricated by bonding **GaInAsP/InP** film on top of the **InP/SiO₂** host substrate.

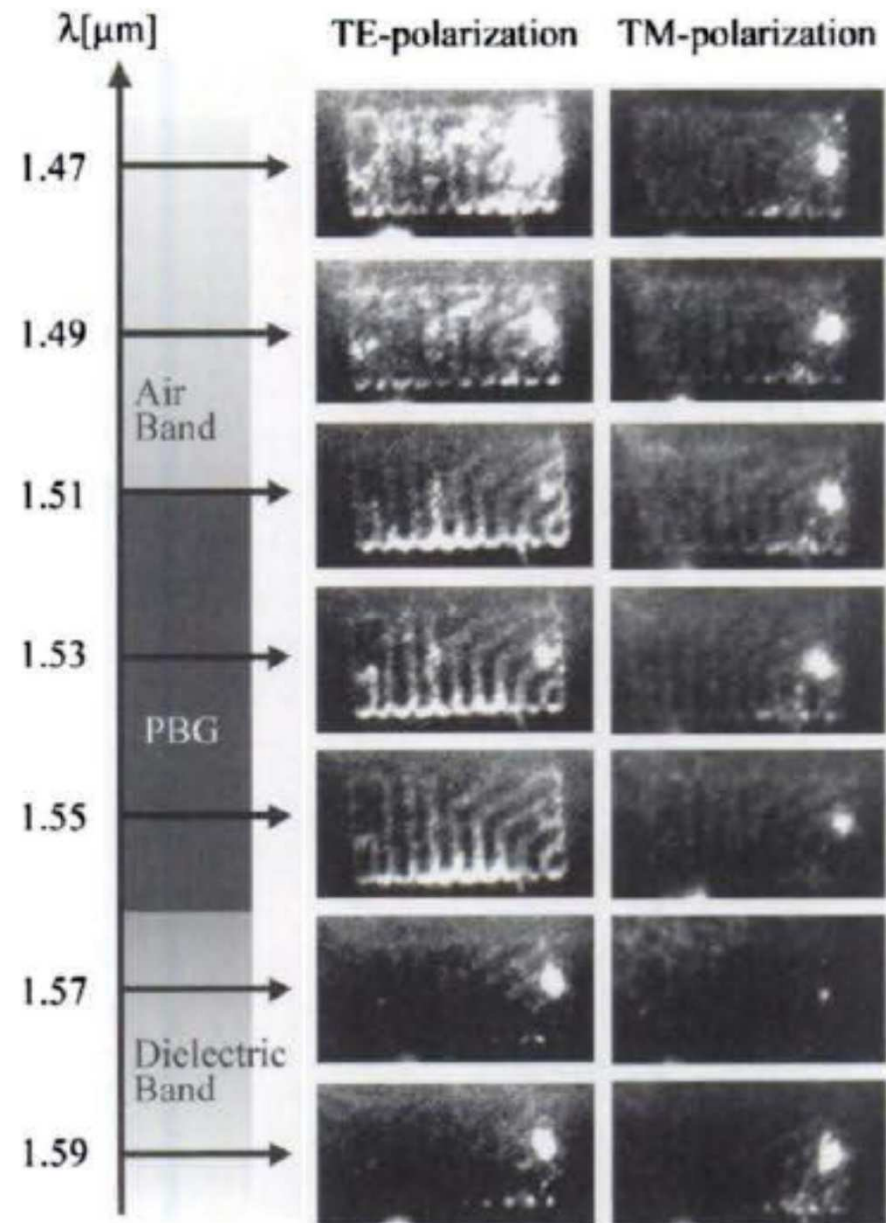


Fig. 11.13. Photonic bands of a *single line defect* in a photonic crystal *slab*:

(a) *TE-like* polarization; (b) *TM-like* polarization

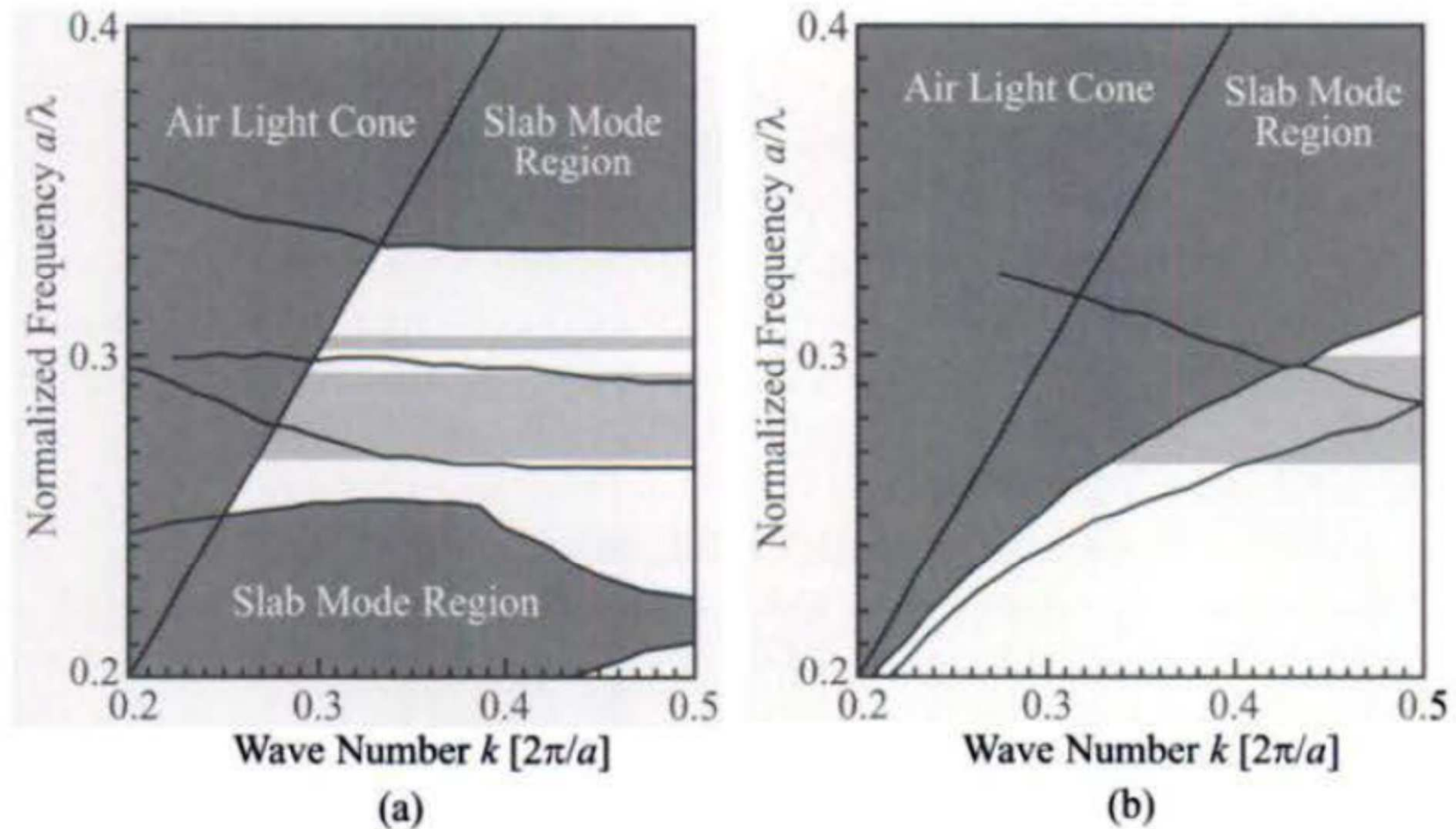


Fig. 11.14. Fabricated single *line defect waveguide* and propagation *loss*:
(a) picture of waveguide fabricated on SOI wafer;
(b) measured *propagation loss* spectrum

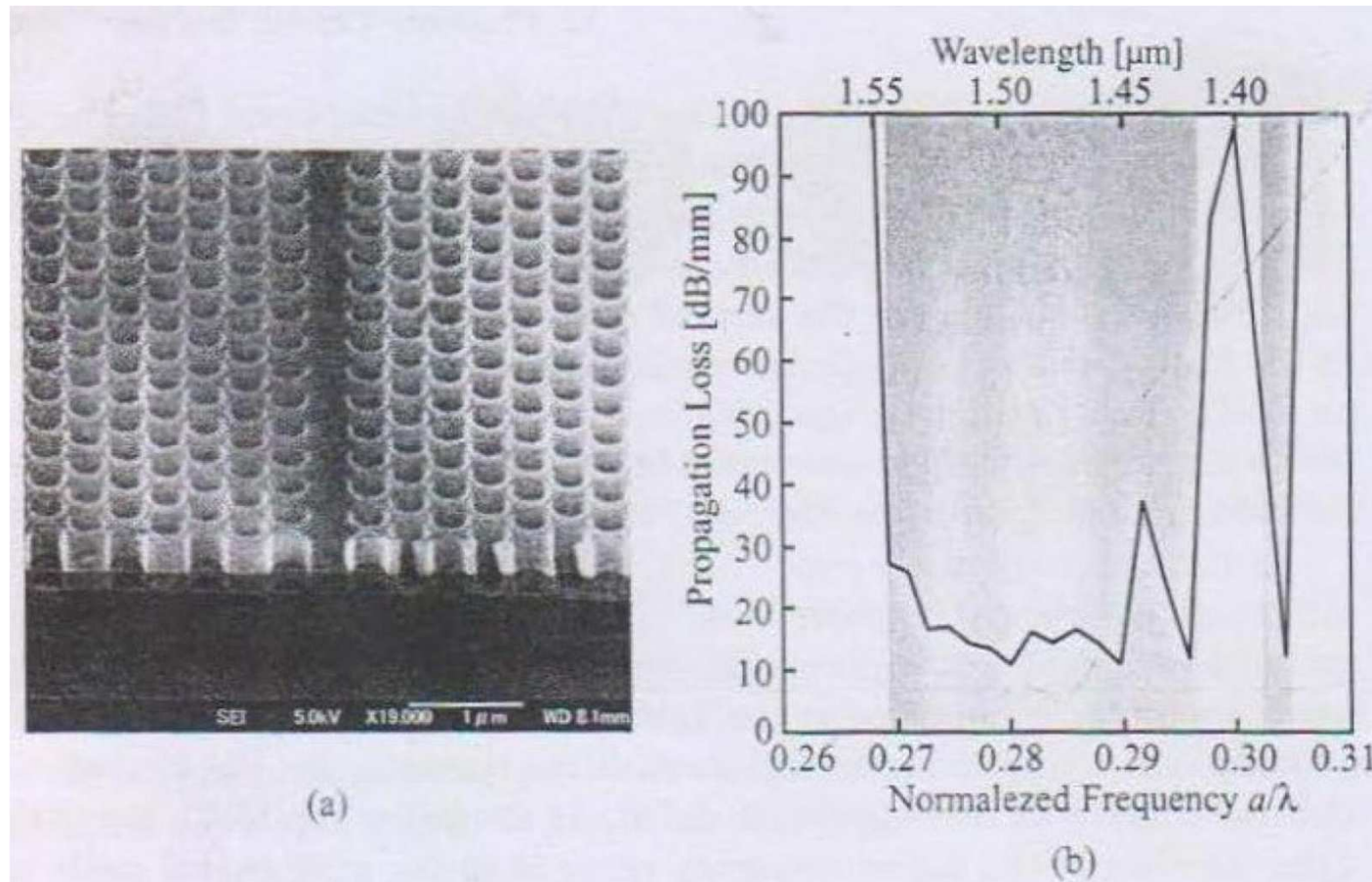


Fig. 11.15. Modified *bend* structures in a phC crystal *waveguide* and their *transmission* spectra calculated by the FDTD method

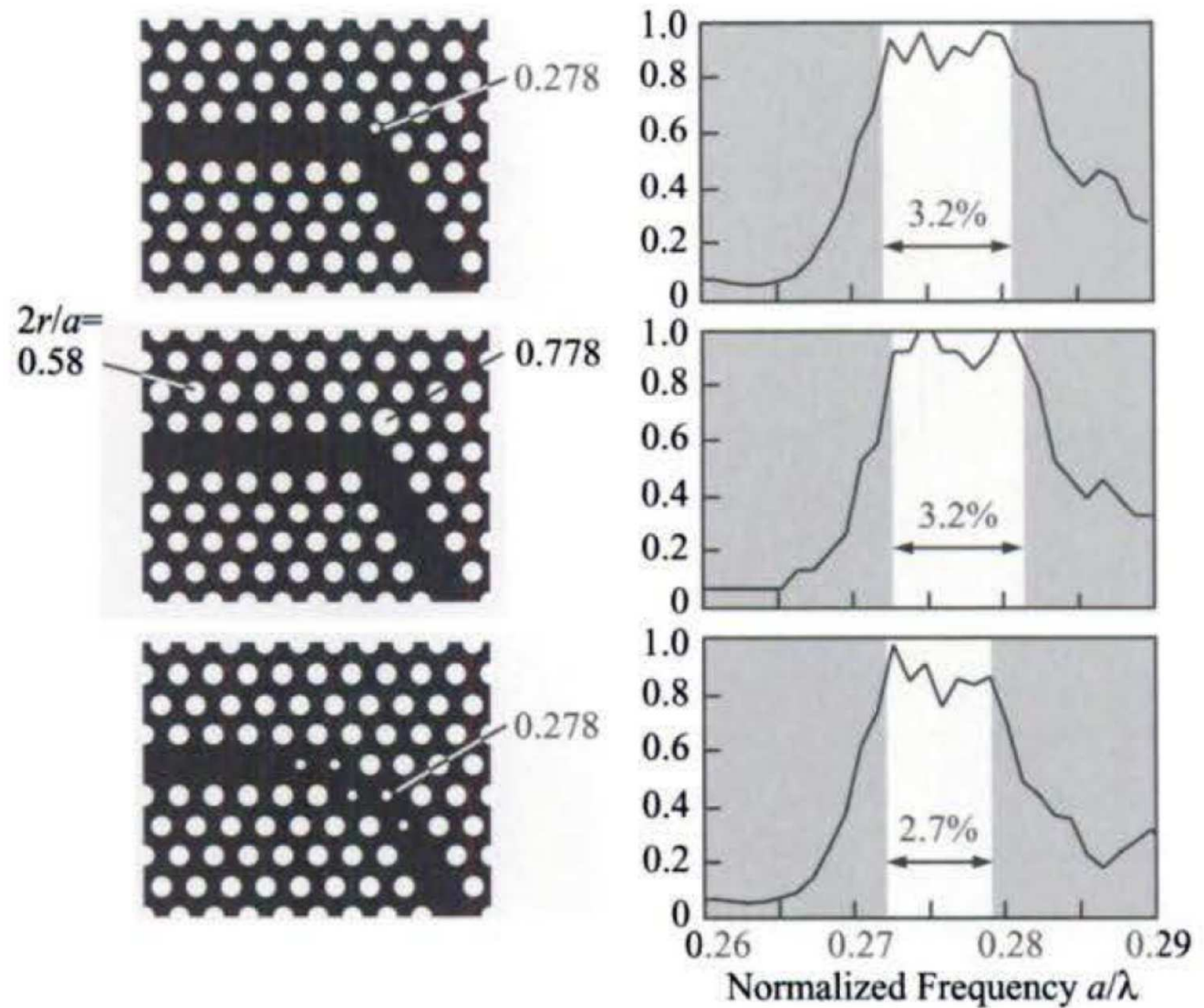


Fig. 11.16. Comparison of silica waveguide, Si photonic wire (PW) waveguide and Si photonic crystal (PC) waveguide for high-density photonic integration

	σ [nm]	Δ [%]	α_s [dB/mm]	S [mm ²]	r [mm]	N [piece]
Silica	50	0.3	<0.01	50^2	>2	50
Si PW	20	45%	10	0.05^2	0.002	50
	4	45%	0.4	$>1^2$	0.002	20000
Si PC	4	45%	<0.1	$>4^2$	0.002?	>100000?

11.4 Optical Fibers

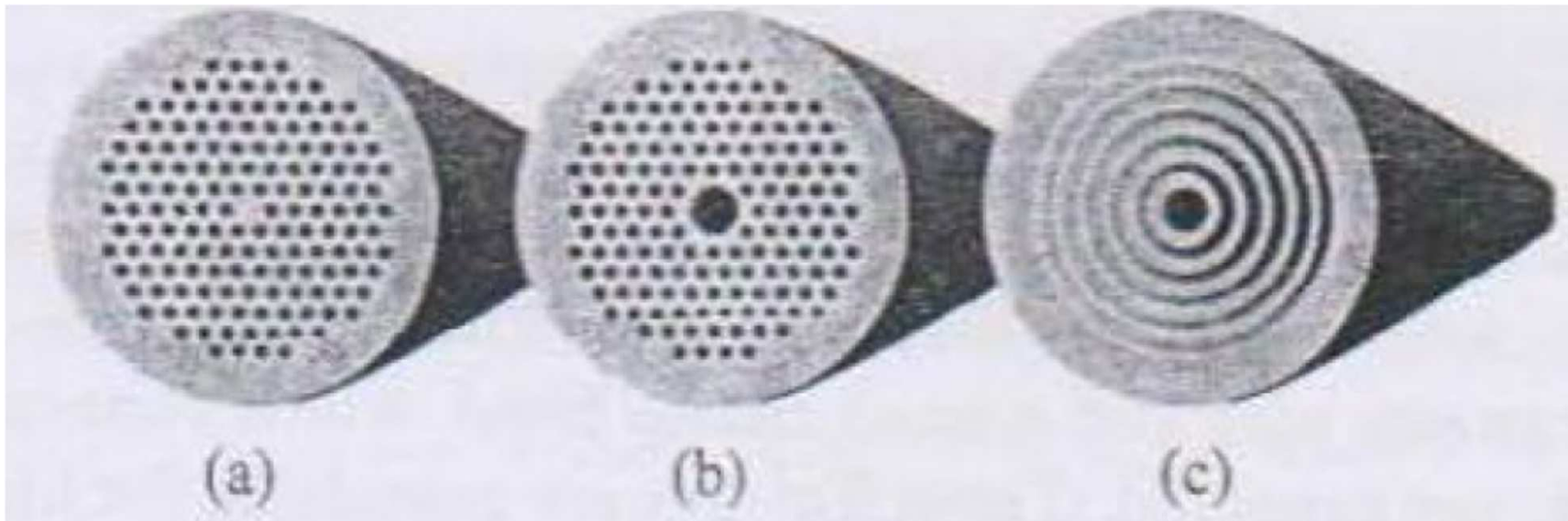


Fig .11.17. Cross-sectional structures of *photonic crystal fibers*:

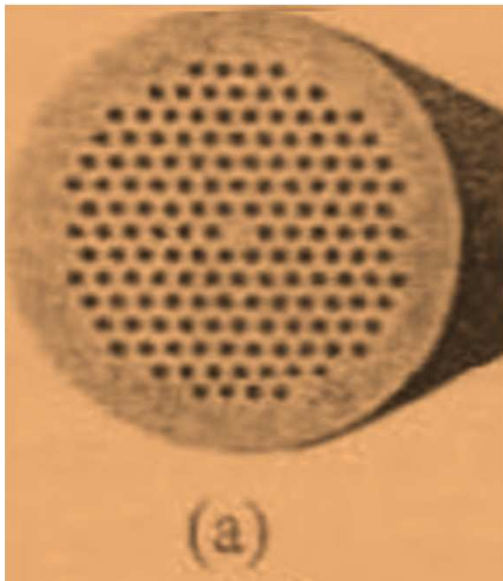
(a) holey fiber;

(b) photic band-gap fiber,

(c) Bragg fiber

11.4.1 Holey Fiber

(a) holey fiber;



❖ قاعده کلی انتشار نور در **فیبر توخالی** بر اساس شکاف باند فوتونی نیست. (انعکاس کلی داخلی رخ میدهد).

❖ **تلفات انتشار** به حدود 0.5 dB/km کاهش مییابد

(تلفات اضافی از جذب و نا خالصی ها ناشی میشوند).

❖ فیبر ویژگی منحصر به فردی برای **موقعیت تک مد** دارد.

(به شدت با **محبوس شدن نوری**، مشخصه **پاشندگی** و **قطبش** رابطه دارد).

1. نور با **طول موج بلندتر** به پوشش بلور فوتونی نفوذ میکند،

بنابراین **ضریب موثر پوشش** کاهش مییابد و **محبوس شدن نوری شدیدتر** میشود.

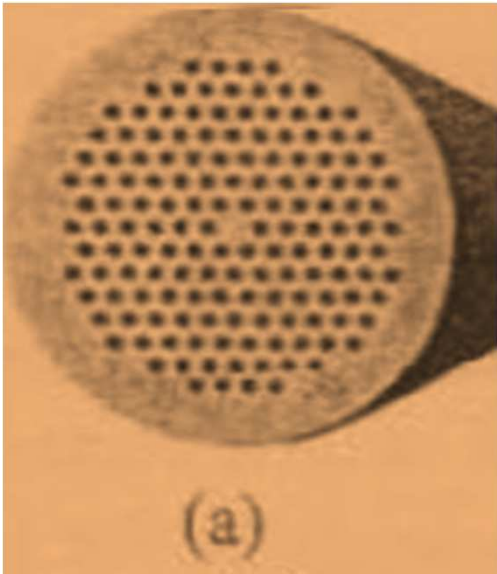
❖ نور با **طول موج کوتاه** نیز به خوبی در سیلیکا در پوشش بلور فوتونی محبوس میشود، بنابراین **ضریب موثر** به **ضریب هسته** نزدیک میشود و **محبوس شدن نوری** به طور ملایم **ضعیف** میشود.

❖ **موقعیت تک مد** در یک محدوده **فرکانسی خیلی عریض** باقی میماند.
(از قابل رویت تا مادون قرمز)

❖ این ویژگی برای یک انتشار **تک مد** با اندازه **کوچک** یا **بزرگ هسته** به کار میرود که **چگالی توان نوری** و **خصوصیات غیرخطی** را **افزایش** و یا **کاهش** میدهند.

11.4.1 Holey Fiber (Cont.)

(a) *holey fiber*;



2. مقادیر خیلی بزرگ **پاشندگی مثبت**، منفی یا صفر، به طور دلخواهی توسط **تغییرات شبکه** و **قطر حفره‌ها** طراحی شده است. **برای مثال:**

❖ به طور تئوری، **پاشندگی منفی** 2000 ps/nm/km - در طول موج $1.55 \mu\text{m}$ پیش بینی شده است.

❖ به طور تجربی، طول موجی که **پاشندگی** برابر با **صفر** دارد در $0.8 \mu\text{m}$ تشخیص داده شده است،

❖ به طور تئوری، **پاشندگی مثبت** 200 ps/nm/km در محدوده طول موج $0.6 \sim 1.0 \mu\text{m}$ پیش بینی شده است.

3. مشخصه **دوشکستی** منحصربه‌فرد و توابع حفظ‌کننده‌ی **قطبش** از نظر تئوری و تجربی مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته‌اند.

❖ برای این منظور، به شمار زیادی حفره‌ی هوایی نیاز نداریم. فیبرهای گوناگون با حفره‌های کمتر بررسی شده‌اند.

11.4.2 Photonic Band-Gap Fiber

□ این فیبر مبتنی بر انعکاس شکاف باند فوتونی است که می‌تواند توسط طراحی شبکه یا قالب حفره‌ها کنترل شود.

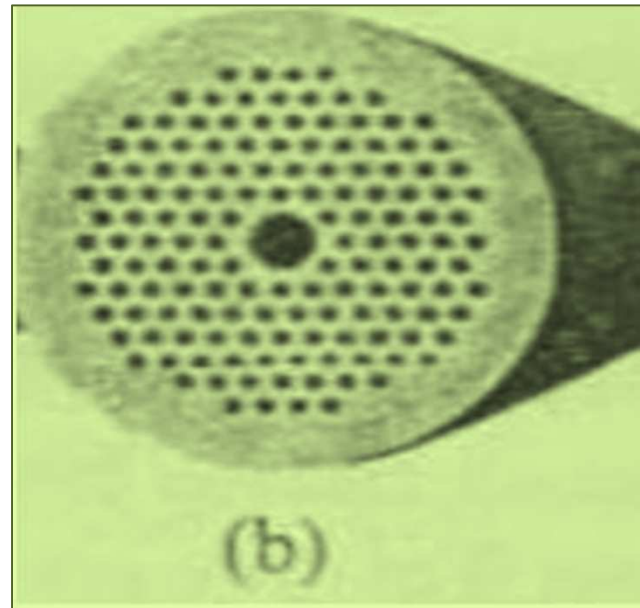
□ انتشار تک مد در یک هسته با اندازه بزرگ و شعاع انحنای کوچک، که در فیبر توخالی نمی‌تواند به دست بیاید، پیش بینی می‌شود.

□ این ویژگی برای گسیل توان بالا با خصوصیات غیرخطی کوچک، امیدوار کننده است.

□ اخیراً تلفات انتشار به مرتبه‌ی dB/km کاهش یافته است.

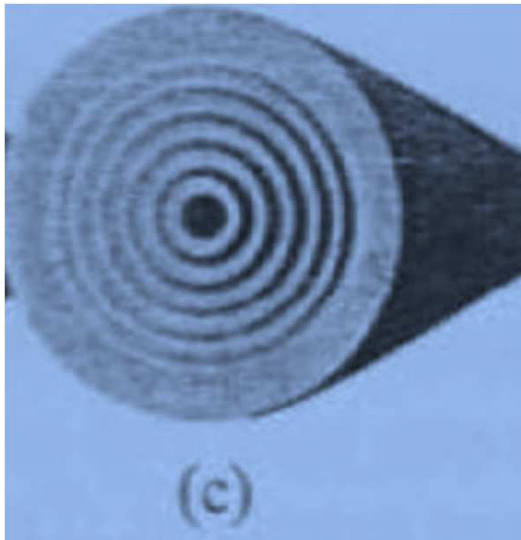
□ موضوعی که باقی می‌ماند این است که بر محدوده گسیل نسبتا باریک، که توسط محدوده PBG تعیین میشود، چیره شویم.

(b) photic band-gap fiber;



11.4.3 Bragg Fiber

(c) Bragg fiber;



- ❖ این فیبر مبتنی بر کشف **خصوصیات انعکاس کاملاً جهتدار** از یک بلور فوتونی یک بعدی است، (فیلم‌های چند لایه‌ی دی‌الکتریک)
- ❖ باند توقف از یک **چینش متناوب** از دو محیط **دی‌الکتریک مختلف**، به زاویه برخورد و **قطبش** وابسته است.
- ❖ انتخاب مناسبی از **ضریب شکست** دو محیط، **باند توقف** ثابتی را برای هر جهت و هر قطبش مجاز می‌کند.
- ❖ این خصوصیت به عنوان یک پوششی از یک **فیبر هسته‌ای توخالی** استفاده می‌شود، که گاهی اوقات **فیبر براگ** نامیده می‌شود.
- ❖ نه فقط انتظار داریم که به عنوان یک **فیبر گسیل‌کننده‌ی توان بالا** باشد، بلکه به عنوان **فیبر مخابرات نوری** نیز استفاده می‌شود، که فاقد **مکانیزم تلفات** در فیبرهای سیلیکا است.

11.5 Wavelength Filters

❖ انواع مختلف فیلتر طول موج:

۱- نوع تشدید شده یا رزونانسی، (*resonant*)

۲- نوع کوپلر جهتی، (*directional coupler*) ۳- نوع پراش (*diffraction*)

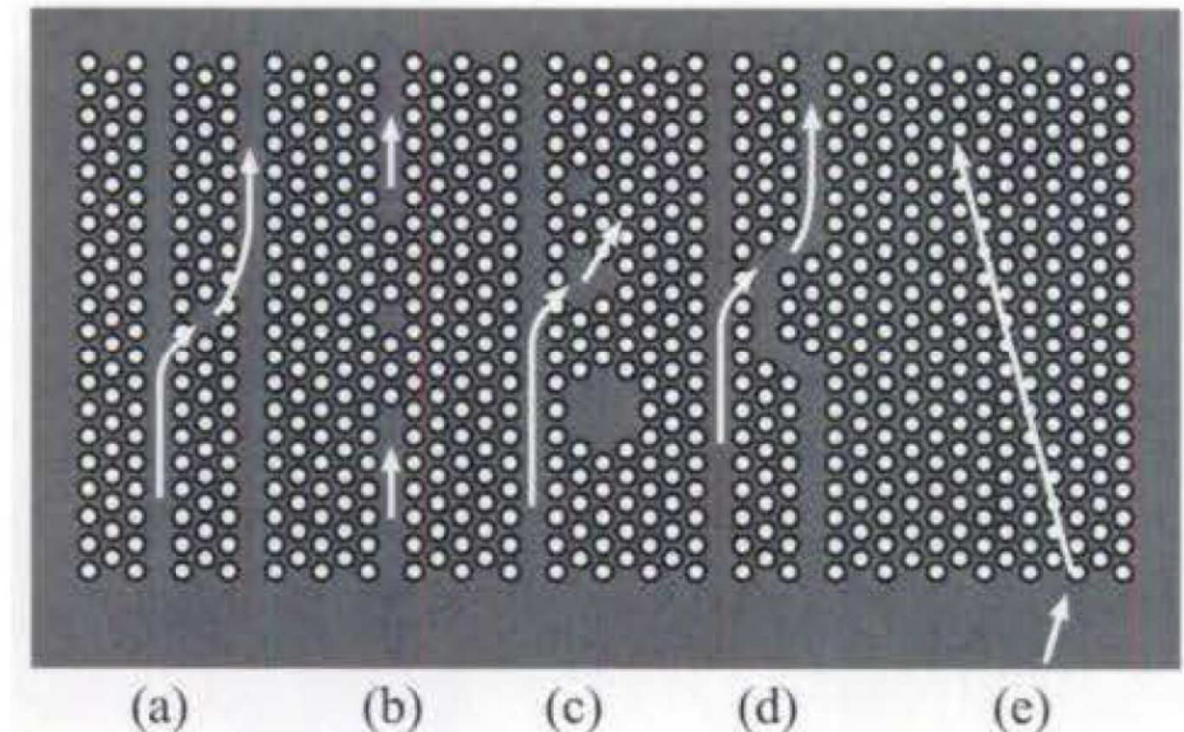
Fig. 11.18. Various types of *wavelength filter* in a 2D photonic crystal:

(a), (b) Resonant filters with *parallel* waveguides and *series* waveguides, respectively;

(c) Resonant filter *coupled* with free space;

(d) directional coupler;

(e) *diffraction filter* based on *superprism effect*



11.5.1 Resonant Type Filter (1)

- (1) **نقص نقطه‌ای** در یک بلور فوتونی می‌تواند در نقش یک **کاواک کوچک** برای امواج نوسانی سینوسی **نور** باشد.
- (2) بنابراین، می‌تواند یک **فیلتر رزونانسی** با **FSR** بزرگتر باشد. (*FSR: Free Spectral Range*).
- (3) اگرچه **FSR** در کاواک نقص نقطه‌ای توسط عرض **PBG** محدود می‌شود.
(باند C و باند L، از $1.53 \sim 1.61 \mu\text{m}$ و (*Q factor*: $1000 \sim 100,000$))
- (4) برای **خروج نور** رزونانسی، **تزویج به موجبرهای دیگر** و **تزویج مستقیم** به فضای آزاد پیشنهادات زیادی شده و بعدها به عنوان یک **فیلتر اضافه کننده یا حذف**، نیز ارائه شده است.
- (5) **تنظیم پذیری** محدوده فرکانس تشدید به وسیله **کنترل اندازه‌ی نقص** به دست می‌آید.

11.5.1 Resonant Type Filter (2)

(6) برای اینکه یک **فرکانس تشدید** را هدف قرار دهیم، **اندازه‌ی نقص** باید با دقتی از مرتبه‌ی **نانومتر** کنترل شود.

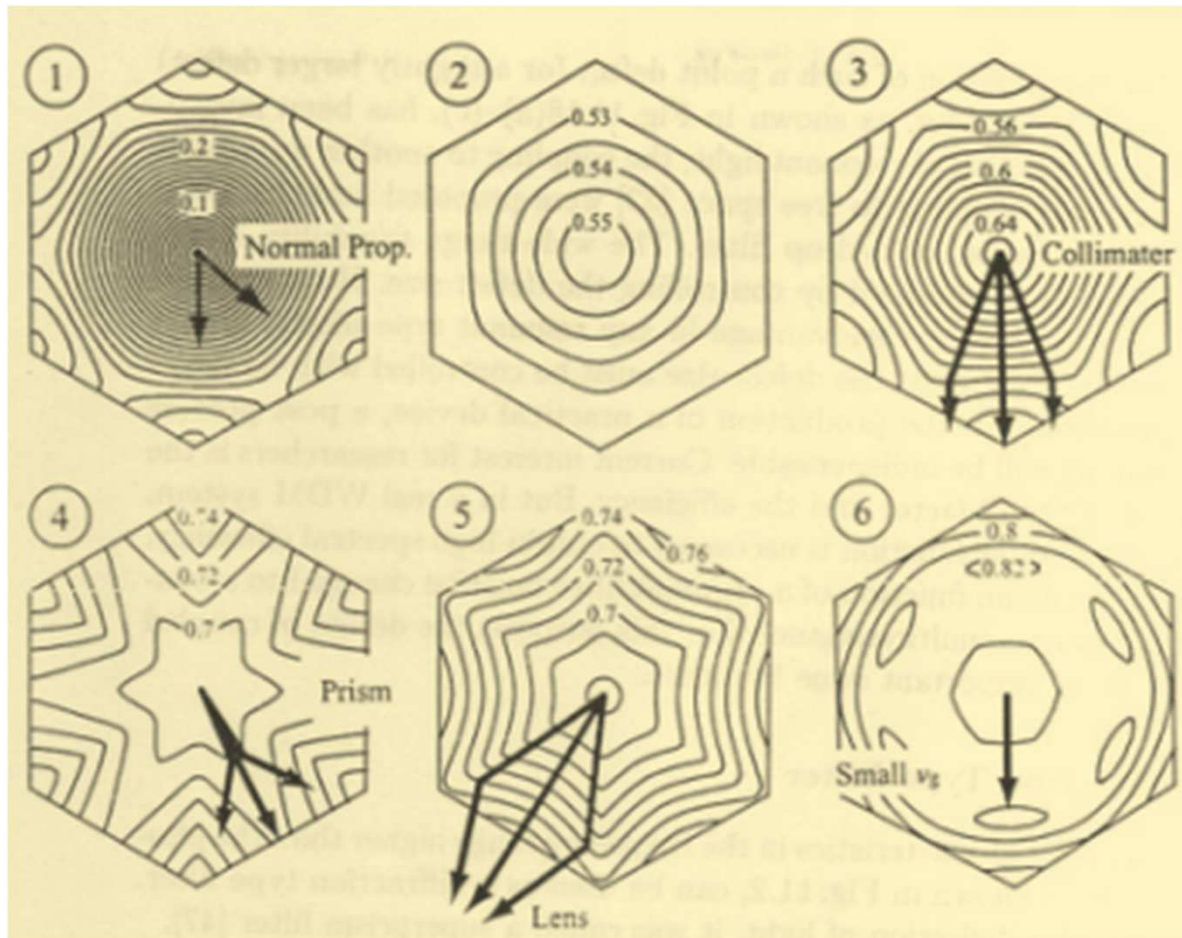
(7) هدف محققان : بهبود **ضریب کیفیت** و **راندمان**

(8) در یک سیستم **WDM** واقعی، **کنترل عملکرد فیلتر** برای به دست آوردن **راندمان طیفی بالا** لازم است.

(9) **تابع لورنتزین** ساده یک فیلتر رزونانسی، باید توسط استفاده از **ساختارهای چند تشدید**، به **حالت مستطیلی** تغییر یابد.

(10) به این منظور، **طراحی نقایص** تزویج شده موضوع مهمی در آینده خواهد شد.

11.5.2 Diffraction Type Filter



❖ **مشخصه پاشندگی** در محدوده فرکانسی خاصی نسبت به شکاف باند فوتونی **بیشتر** است،

❖ لذا می‌توانیم آن را به عنوان یک **فیلتر نوع پراش** بکار ببریم.

❖ به دلیل انعکاس زاویه‌ی نور، یک **فیلتر ابرمنشور** نامیده میشود. (*superprism*)

❖ **انتشار نور در جهت گرادیان سطح پاشندگی** است.

❖ بنابراین، بسته به تغییر شکل **سطوح پاشندگی**، نمایش انتشار نور منطبق بر انتشار بیم، انتشار عدسی محدب یا مقعر است.

Fig. 11.19. Dispersion surface calculated for each band of a 2D photonic crystal

11.5.2 Diffraction Type Filter

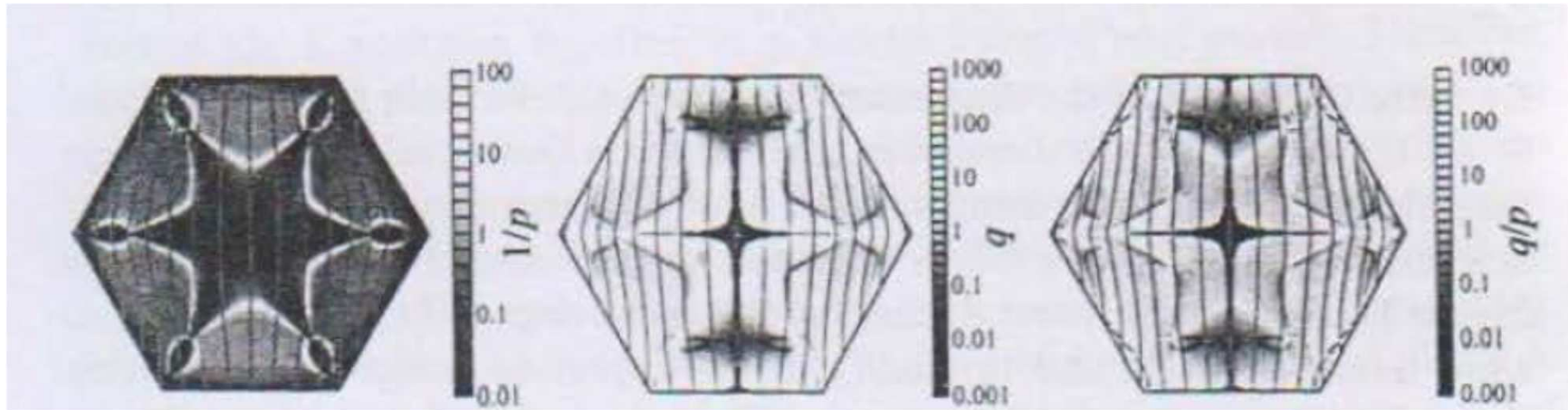


Fig. 11.20. *Beam collimation* parameter $1/p$,
wavelength sensitivity parameter q and
wavelength resolution parameter q/p ,
which are calculated for a *triangular* lattice 2D *photonic crystal*

11.6 Polarization Filters

- وابستگی قطبش شدیدی در کل ساختارهای مشابه بلورهای فوتونی وجود دارد.
- منحنی‌های باند فوتونی دو بعدی، برای هردو قطبش متعامد خیلی متفاوت است.
- این ویژگی به سادگی برای فیلتر انتخابگر قطبش به کار می‌رود.
- روش ساده برای پیاده سازی یک فیلتر قطبش، استفاده از شکاف باند فوتونی (فیلتر نوع بازتابی) است.
- یک بلور فوتونی دو بعدی چندلایه که روی زیرلایه‌ی موجداری قرار گرفته است، به عنوان یک فیلتر نوع ورودی عمودی استفاده می‌شود، و عملکرد بسیار خوبی با تلفات انتقال کمتر از 0.5 dB و نسبت جذب 50 dB - را می‌تواند به نمایش بگذارد.

11.7 Dispersion Compensators

- ❖ با طراحی بهینه **مشخصه‌ی پاشندگی** از یک بلور فوتونی حجیم یا یک موجبر بلور فوتونی، **ضریب جبران پاشندگی** نسبت به یک **فیبر جبران پاشندگی**، **بزرگتر** خواهد شد.
- ❖ بدلیل **تاشدگی‌های باندهای متقارن** در لبه‌ی باند، انتظار می‌رود که **جبران باند وسیعی** از مشخصه‌ی موجبر کاواک تزویج شده، بتواند صورت گیرد.
- ❖ این چیزی است که برای **کوچک سازی و تنظیم** در ادوات جبران کننده‌ی پاشندگی انتظار می‌رود. اگرچه، اندازه‌ی ادوات برآورد شده **تا کنون**، در حدود مرتبه **mm** تا **cm** است.
- ❖ بنابراین، تلفات انتشار موجبرها باید کمتر از **1 dB/cm** شود. به علاوه، **فرکانس نرمالیزه** شده، که برای جبران پاشندگی به کار می‌رود، **نسبتاً زیاد** است (**0.5 >**).
- ❖ وقتی موجبر در یک **بلور فوتونی تیغه‌ای** ساخته می‌شود، این موضوع منجر به مسئله‌ی **تلفات ناشی** بزرگ از نوری که ناشی از **مخروط نور** است می‌شود.
- ❖ **خنثی کردن** این **تلفات** تشریح اولیه مربوط به این قسمت از **ادوات** است.

11.8 Light Control Devices (1)

- ❑ در عصر **بعد از شبکه** مخابرات **فیبر**، توسعه **سوییچ فوتونی** و **تنظیم کننده طول موج**، دو تا از مهمترین ادوات خواهد بود.
- ❑ در ادوات متعارف، اثر **پلاسمای حامل**، اثر **جذب الکترون**، اثر **پاکل**، اثر **کر**، اثر **مدولاسیون بهره عبوری**، اثر **ترکیب چهار موج** و غیره به کار رفته است.
- ❑ تقویت کننده‌های نیمه‌هادی به طور اهم باعث افزایش تغییرات عملکرد، شامل سوییچینگ off/on ساده توسط تزریق حامل می‌شود.
- ❑ اگرچه، **مد نقص نقطه‌ای** و **باند با V_g کوچک**، **چگالی نوری** داخلی را **افزایش** می‌دهد، که نتیجه آن، **افزایش اثرات** است. یک اثر مشابه، در **سنجی فابری پرو** دیده می‌شود.
- ❑ **مصالحه ای** وجود دارد که رابطه‌ای بین **افزایش** و **باریک شدن باند انتقال** برقرار می‌کند.
- ❑ به علاوه، انتقال بالا فقط در بالای تابع لورنتزین در یک **سنجی مشابه فابری پرو** به دست می‌آید.
- ❑ بنابراین، یک **پالس نوری کوتاه** با **طیف وسیع** نمی‌تواند این **افزایش** را **تقویت** کند.
- ❑ این محدودیت می‌تواند توسط **طراحی کاواک تزویج شده** تعدیل شود، که **انتقال** را به اطراف **مرکز فرکانس رزونانس** گسترده می‌کند.

11.8 Light Control Devices (2)

- ❑ در PC با ابعاد بالاتر، نور متمرکز شده در نقص نقطه‌ای، یک اثر مشابه را تحقق می‌سازد. تزویج نور به نقص، با کاربردن موجب نقص خطی ممکن خواهد شد.
- ❑ سرعت گروه در یک باند فوتونی با ابعاد بالاتر، کمتر از 0.1 فضای آزاد است.
- ❑ نزدیک لبه‌ی باند، پاشندگی بزرگتری وجود دارد، بنابراین این باندها، برای کنترل پالس‌های کوتاه مناسب نیستند. اما در میانه‌ی ناحیه‌ی بریلیون، پاشندگی برابر با صفر و سرعت گروه کوچک، تحقق می‌یابد.
- ❑ ادوات دیگری که نور را کنترل می‌کنند، ادوات انحراف از پرتو نوری هستند که در اسکنرها، نمایشگرها و سویچ‌های نوری ویژه استفاده خواهند شد. برای این ادوات، اثر ابرمنشور نیز موثر است.
- ❑ انحراف نور برای طول موجهای مختلف پرتو وارده به یک ابرمنشور بلور فوتونی با پایانه‌های خروجی زاویه‌دار شده در شکل ۱۱-۲۱ آمده است.
- ❑ همه‌ی ادواتی که در اینجا بررسی شدند ادوات نوع انتقال نور هستند. بنابراین، راندمان انتقال زیاد، یک موضوع مهم است.
- ❑ چون باندهای فرکانسی بالاتر، پروفایل میدان پیچیده‌ای از تابع بلاخ دارند، تزویج نور خارجی (یک موج صفحه‌ای) در کل کم است. اگرچه، تزویج می‌تواند توسط یک رابط مناسب از بلور فوتونی بهبود بخشیده شود، که عدم تطبیق میدان را از بین می‌برد.
- ❑ تغییرات تدریجی اندازه و شکل دهی بلور فوتونی، در شکل ۱۱-۲۲ نشان داده شده است که راندمان انتقال نور بیشتر از 93% از لحاظ تئوری ثابت شده است.

11.8 Light Control Devices (1)

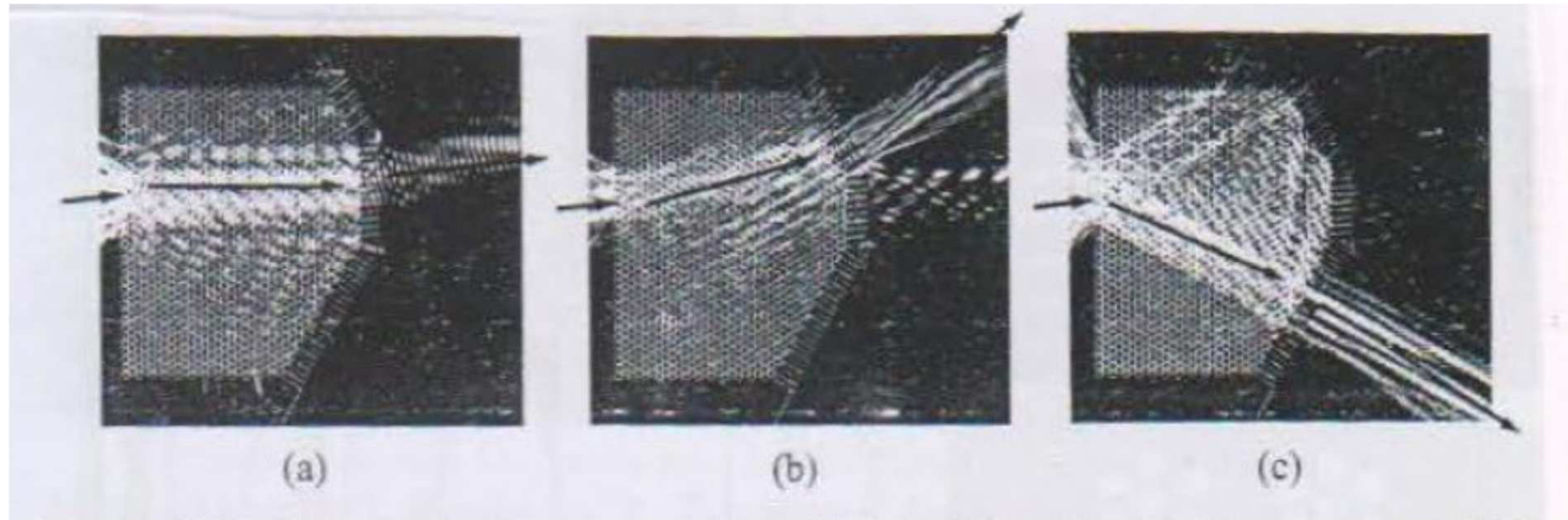


Fig. 11.21. Numerical demonstration of *light deflection* device by the **FDTD** method, where the *superprism* phenomenon in a *2D photonic crystal* of *holes* is utilized:
(a) normalized frequency of **0.55**; **(b)** **0.61**; **(c)** **0.70**

11.8 Light Control Devices (2)

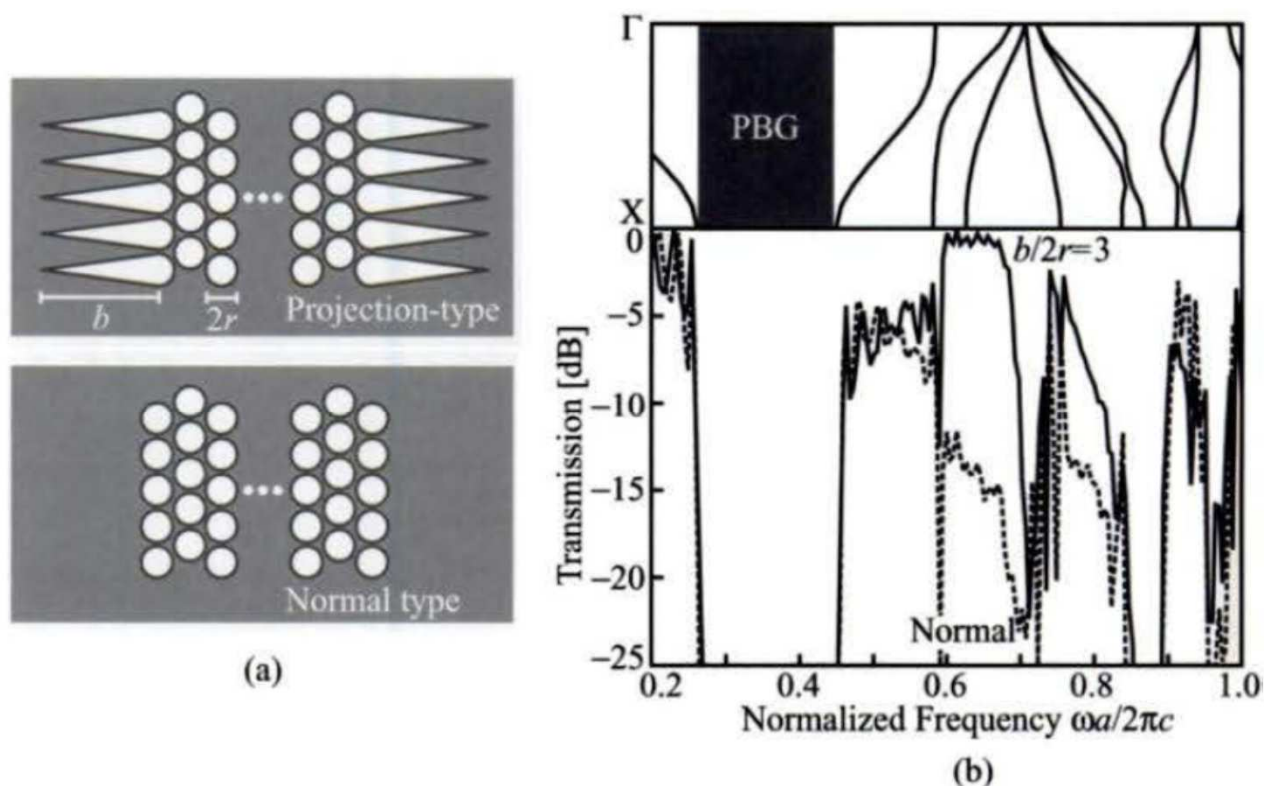


Fig. 11.22. High-efficiency **input/output interface** for light **transmission** through a 2D photonic crystal of **holes** in a **triangular lattice**:

(a) schematics of **projection type** and normal interfaces;

(b) photonic band diagram and **transmission spectra** calculated by the FDTD method.

11.9 Harmonic Generation

❖ برای بهبود بخشیدن راندمان تولید هارمونیک، دو اثر در بلورهای فوتونی وجود دارد:

۱- تطبیق فاز چند بعدی ۲- افزایش نور داخلی به وسیله باند v_g کوچک

❖ به عنوان مثالی برای مورد اول، یک LiNbO_3 2D PC با ثابت شبکه a از مقادیر متعدد $1 \mu\text{m}$ تا

$10 \mu\text{m}$ ساخته شده‌اند، و تولید هارمونیک چند پرتو از لحاظ تجربی ثابت شده است. این تجربه

همچنین یک شرایط تطبیق فاز ساده تر توسط بلور فوتونی را نشان می‌دهد.

❖ از طرف دیگر، اثر دیگر شبیه به حالت افزایش اثرات غیرخطی نور است، که در این حالت، ثابت

شبکه کمتر از $1 \mu\text{m}$ خواهد بود.

❖ اگر ترکیب این اثرات، تطبیق فازی را مجاز کند، افزایش قوی و تلورانس وسیع، تکنولوژی کلیدی

منحصر به فردی برای تولید هارمونیک هستند.

