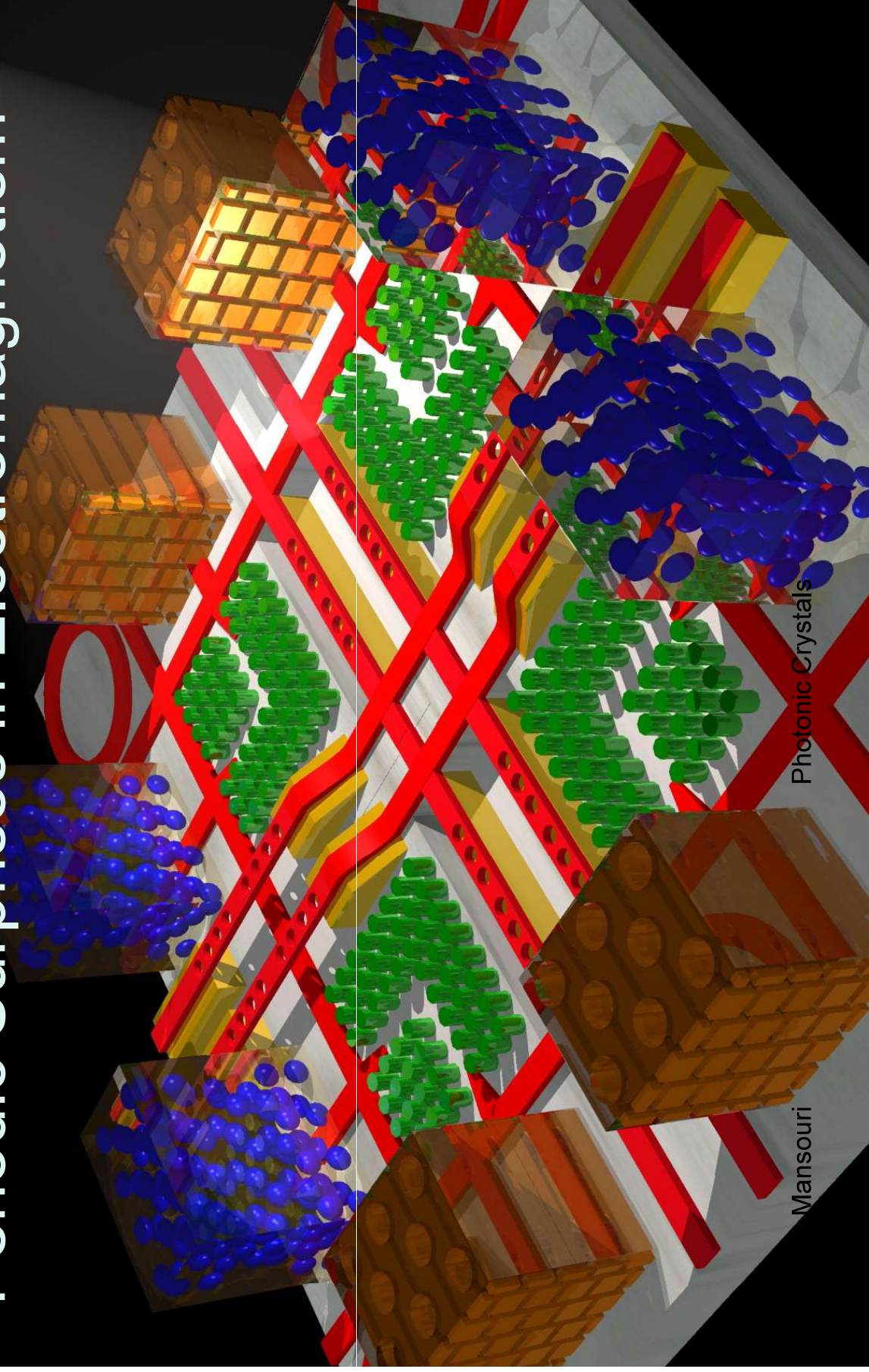


# Photonic Crystals: Periodic Surprises in Electromagnetism



# فهرست مطالب

- مقدمه
- معرفی بسته نرم افزاری RSOFT CAD :
- Beam PROP,
- Full WAVE,
- Band SOLVE,
- Grating MOD

## مقدمه

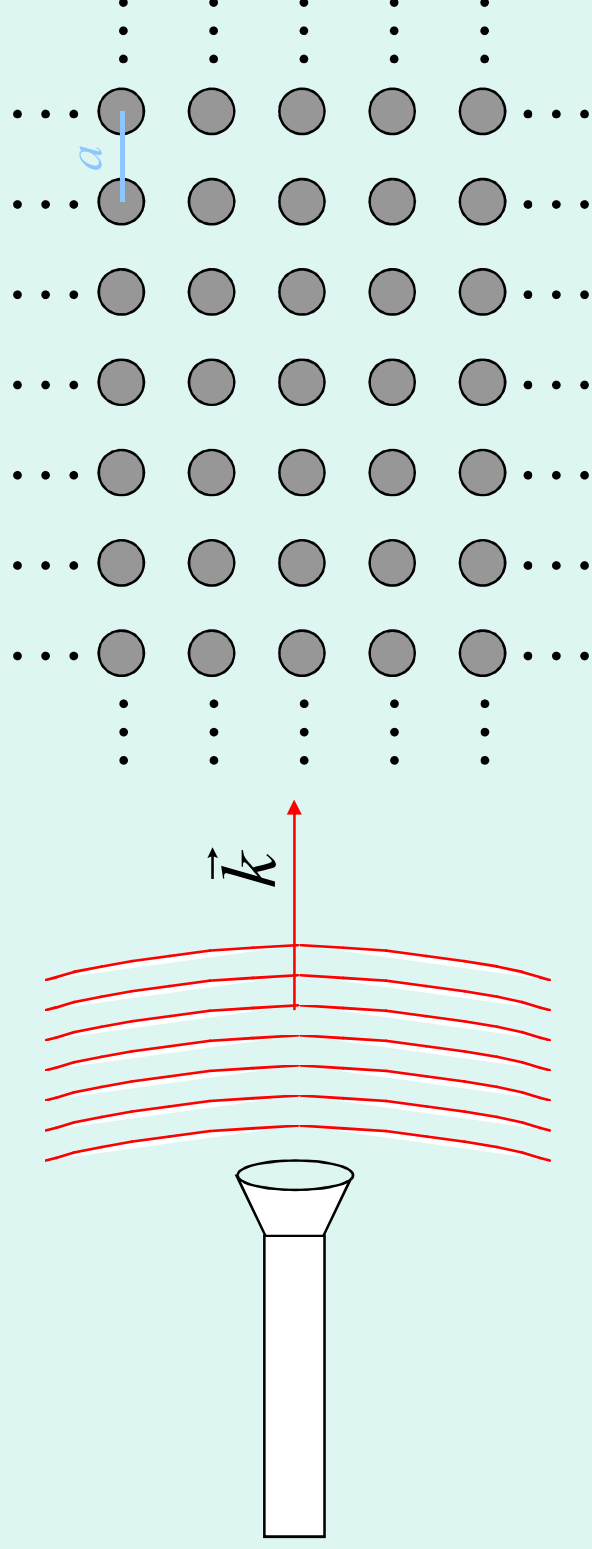
### فوتونیک چیست؟

- پایه و اساس فوتونیک بر روی دو مبحث الکترونیک و فوتونیک بر می گردد و به استفاده مدارات فوتونی (مداراتی که به جای الکترون از فوتون استفاده می شود) در وسایل الکترونیکی مانند رادارها ، فیبرهای نوری و ... توجه دارد.
- در علم فوتونیک، آنچه نقش اساسی را بر عهده دارد برهم کنش نور (فوتون) و ماده است
- در علم الکترونیک نقش اصلی بر عهده برهم کنش الکترون و ماده است.
- با توجه به اینکه فوتون از نظر بر هم کنش با ماده هزاران برتری نسبت به برهم کنش الکترون با ماده دارد. هر روزه شاهد نشانه های این برتری در عرصه ی فناوری های نوین هستیم، به طوری که با رونق علم فوتونیک در اوایل دهه ی ۱۹۸۰، رفته رفته سهم علم الکترونیک در فناوری و زندگی ما کاهش می یابد.
- لیزر، فیبر نوری، نیمه هادی-ها و نانو فوتونیک و کریستالهای فوتونیک از جمله مباحث مطرح در این رشته است.

## مقدمه

- کنترل نور در چه نوع موادی، و چگونه صورت میگیرد؟
- پتانسیل پرئودیک در نیمه هادی → شکاف باند انرژی
- محیط دی الکتریک پرئودیک → شکاف باند نوری
- (اگر ثابت های دی الکتریک در کریستالها به اندازه کافی متفاوت باشند و جذب نور حداقل باشد، سپس پراکندگی در فصل مشترک ها می توانند پدیده هایی که پتانسیل اتمی برای الکترونها انجام می دهد، برای فوتونها (مودهای نوری) تولید کند.)
- امواج در محیط پرئودیک میتوانند بدون پراکندگی انتشار یابند.

# مقدمه



planewave

$$\vec{E}, \vec{H} \sim e^{i(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t)}$$

$$|\vec{k}| = \omega / c = \frac{2\pi}{\lambda}$$

برای اکثریت  $\lambda$  ها، انتشار باریکه ها از طریق کریستال، بدون پراکندگی صورت میگیرد.

**photonic band gap** اما برای بعضی از  $\lambda$  ها، هیچ نوری انتشار نمی یابد:

## با شروع از معادله ماکسول ← رسیدن به معادله هلم هولتز

$$\nabla \times \frac{1}{\varepsilon} \nabla \times \vec{H} = \left( \frac{\omega}{c} \right)^2 \vec{H} \quad \nabla \cdot \vec{H} = 0$$

عملگر ویژه      مقدار ویژه      حالت ویژه

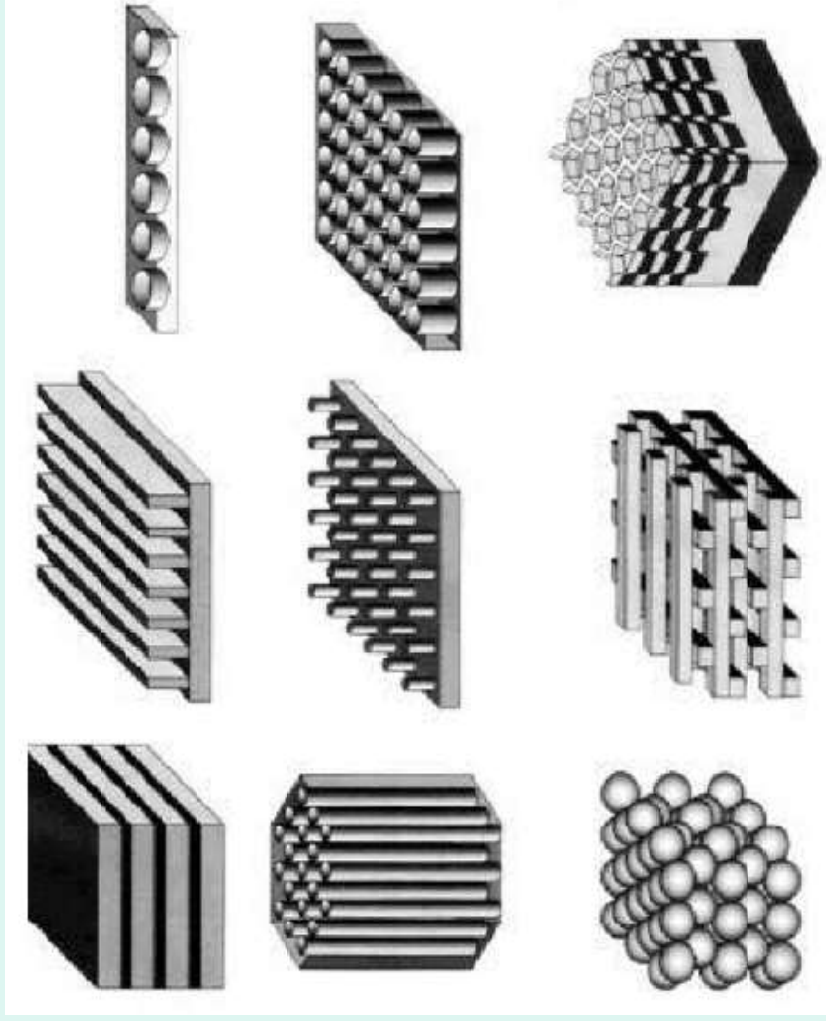
طبق تئوری بلاخ:  $H(x) = \exp(ik \cdot x) u_k(x)$  که  $u_k(x)$  یک تابع با دوره تناوب شبکه است با جایگذاری این فرمول در معادله هلم هولتز "معادله مقادیر ویژه" بدست می آوریم:

$$\hat{L} u_k = (ik + \nabla) \times \left[ \frac{1}{\varepsilon(x)} (ik + \nabla) \right] \times u_k = \bar{\omega}^2 u_k,$$

روش بسط موج صفحه ای (PWE): روش عددی برای محاسبات مودهای مختلف و یافتن شکاف باند

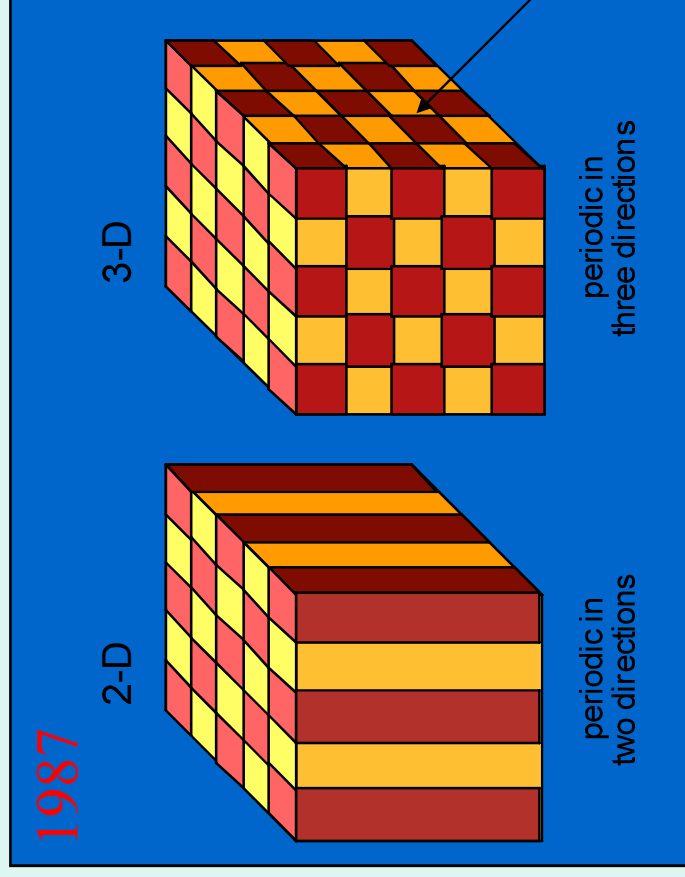
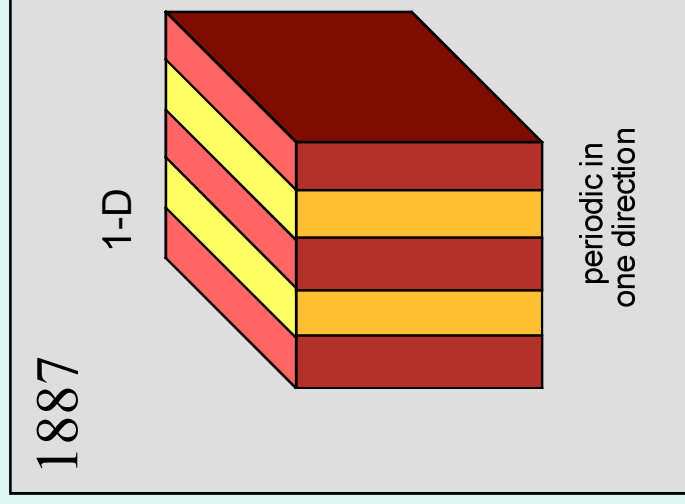
# Review of Photonic Crystals (PhC):

periodic electromagnetic media  
with photonic band gaps: “optical insulators”



# Photonic Crystals

periodic electromagnetic media



Photonic Crystals

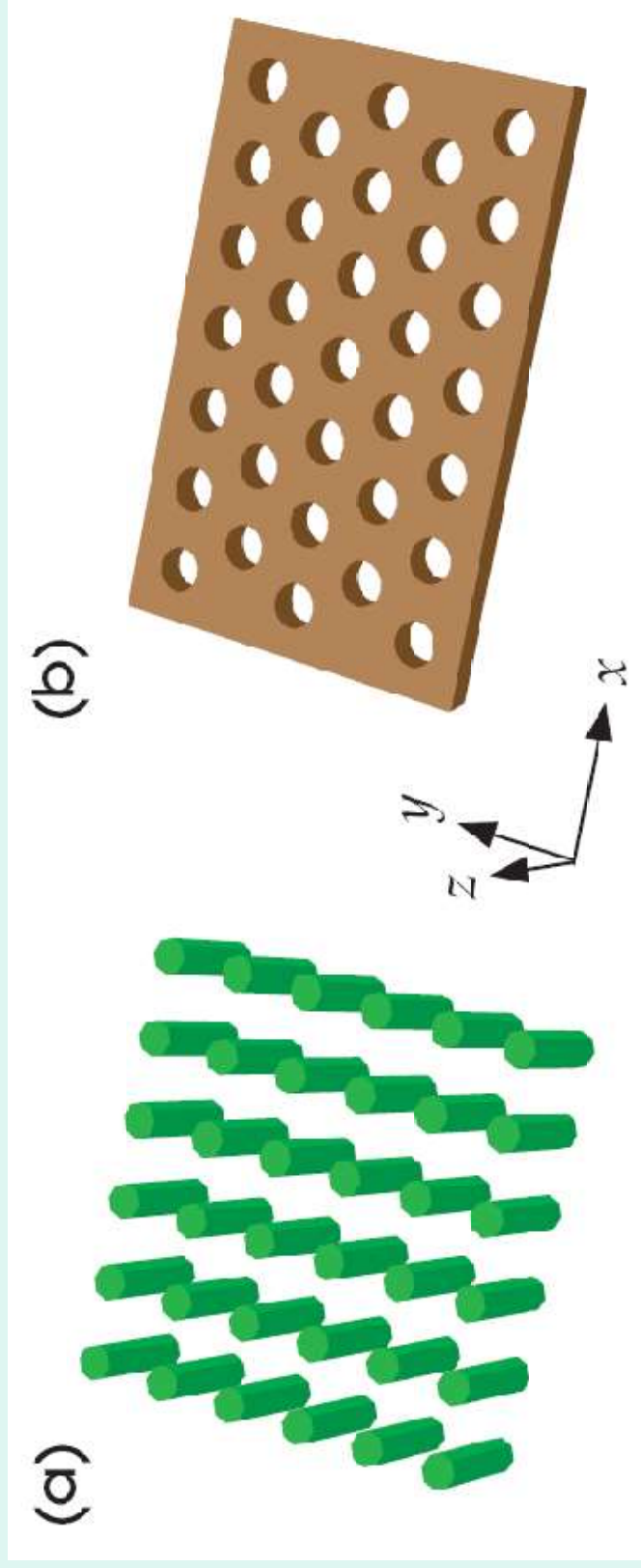
with photonic band gaps: “optical insulators”



## Examples of photonic-crystals slabs:

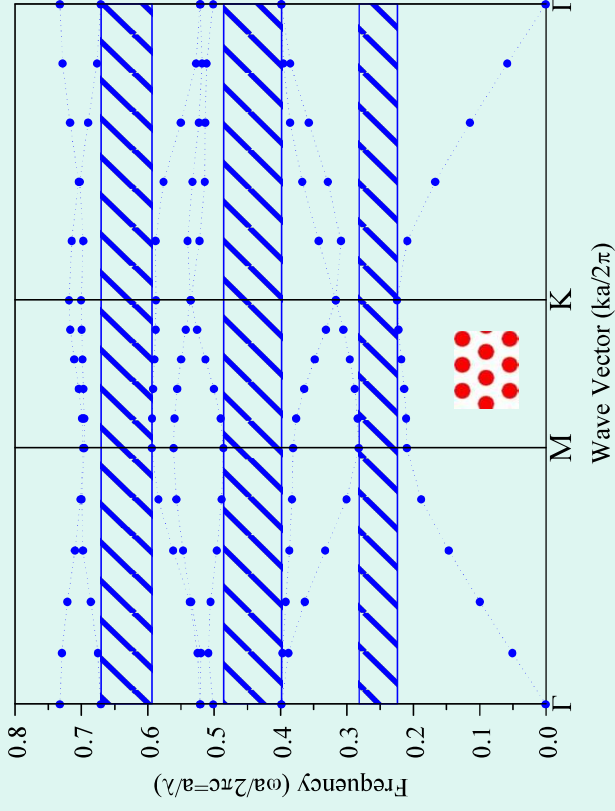
**a) The rod slab**

**b) The hole slab**

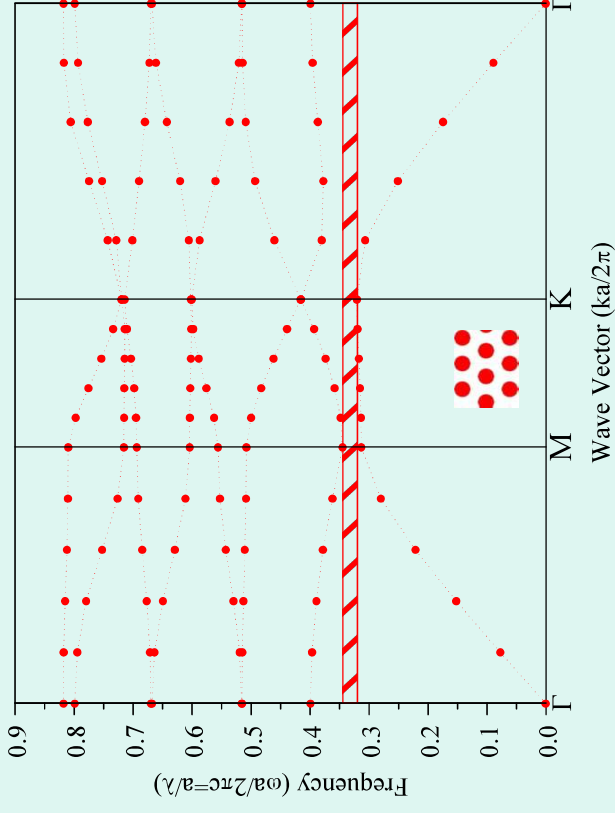


**Pillar, Triangular, Si rod in air,  
[ $\epsilon_r$  (si) = 11.3, or  $n_o = 3.36$ ],  $ra = 0.35$**

TE Band structure

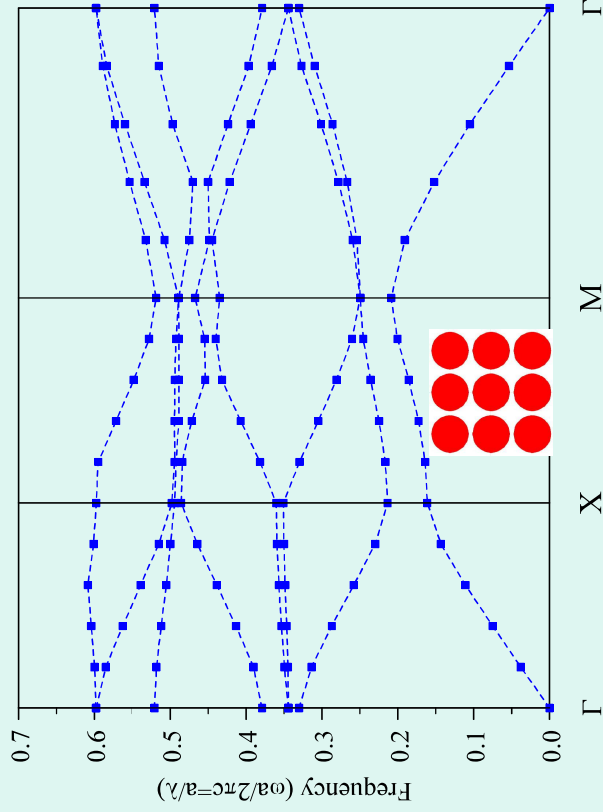


TM Band structure

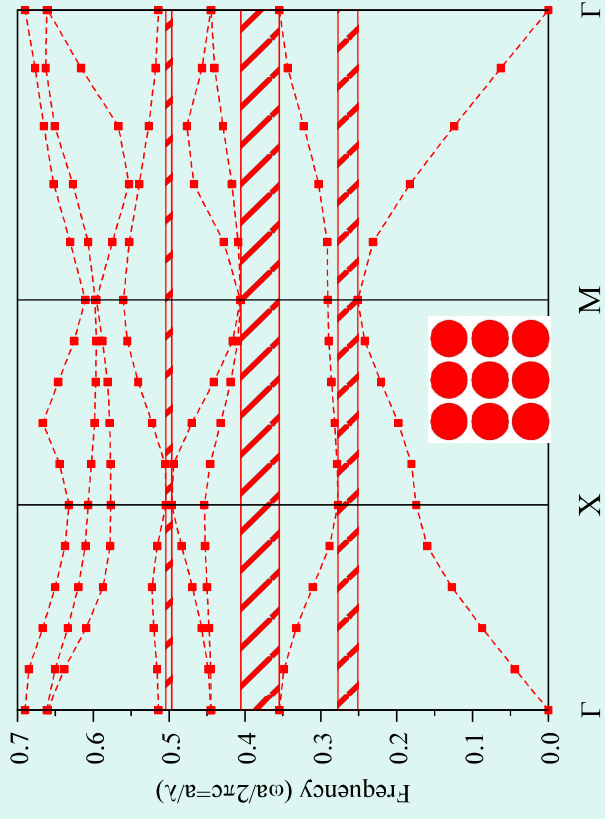


**Air-holes, Square, ( $\text{Si}_{0.75}\text{Ge}_{0.25}$ )  
 $[n_{\text{bulk}}=3.6$  or  $\epsilon_r=12.96$ , ( $ra=0.40$ )]**

TE Band structure

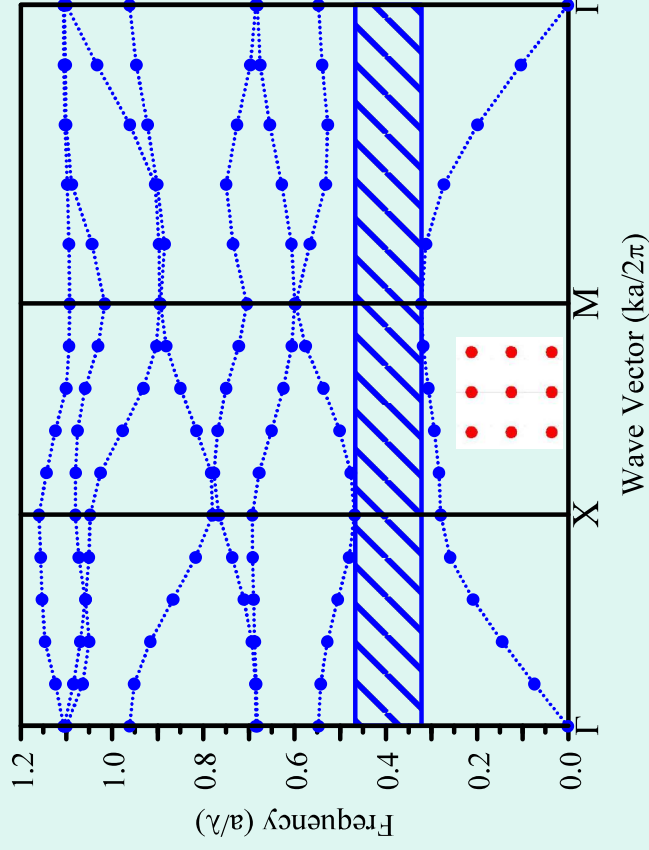


TM Band structure

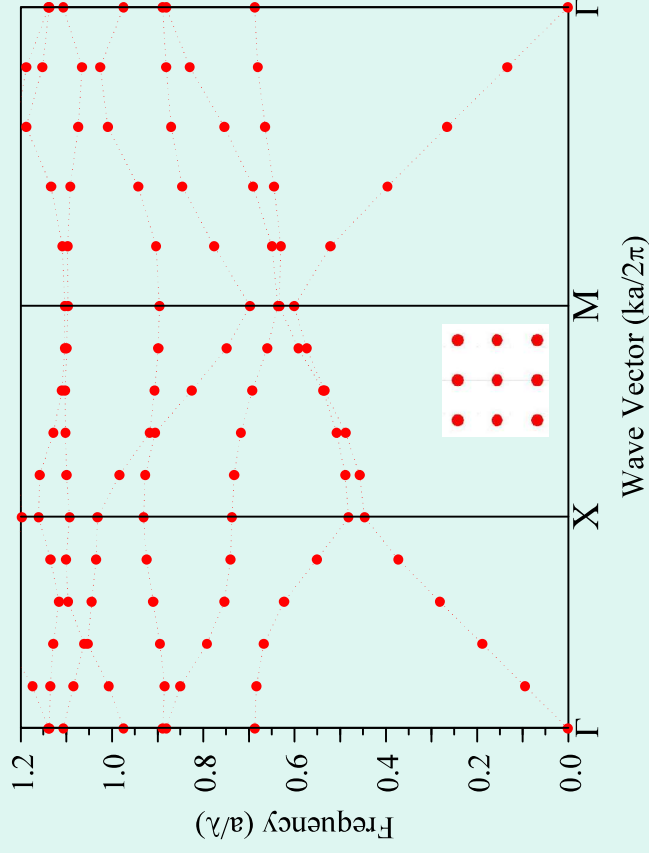


# Pillar, Square, ( $\text{Si}_{0.75}\text{Ge}_{0.25}$ ) $\epsilon_r=12.96$ , ( $na=0.15$ )

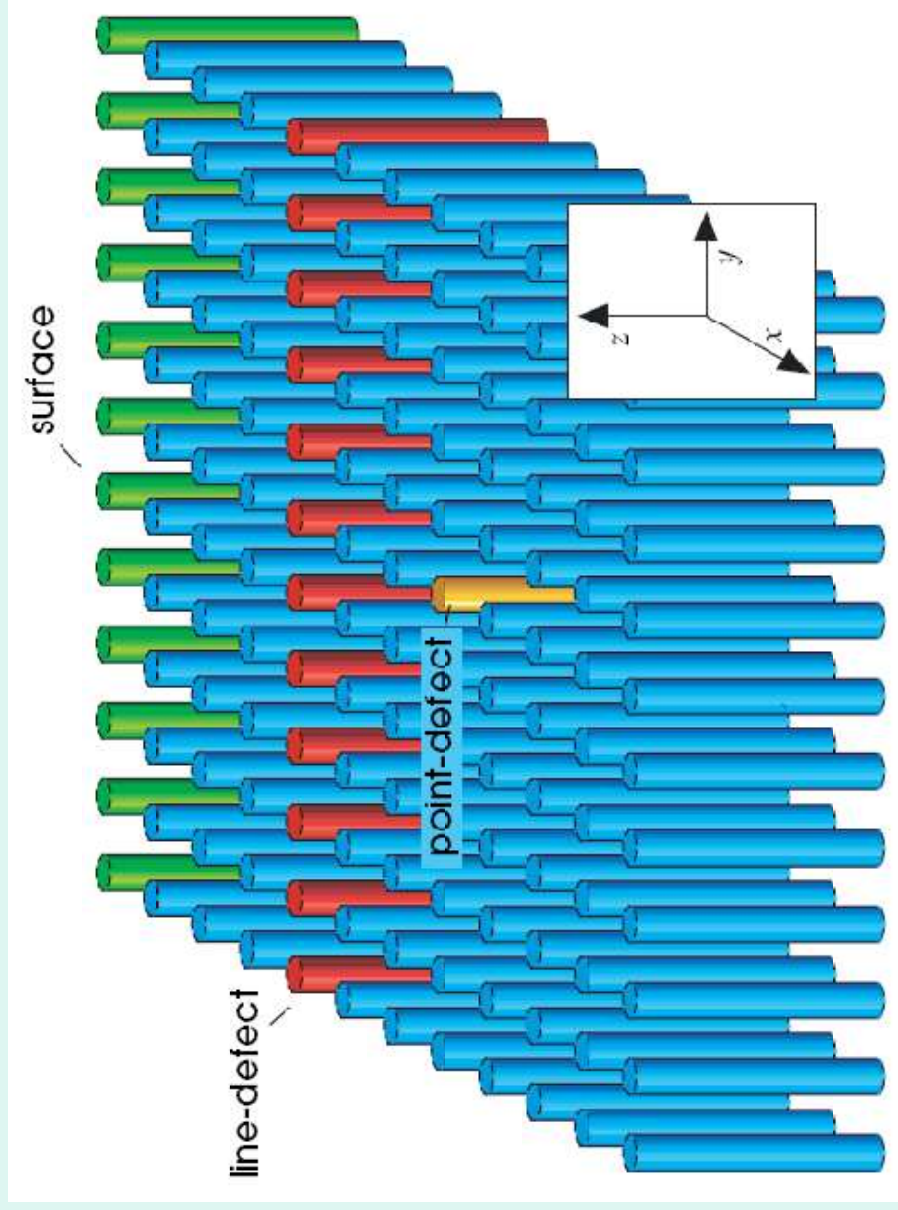
TE Band structure



TM Band structure

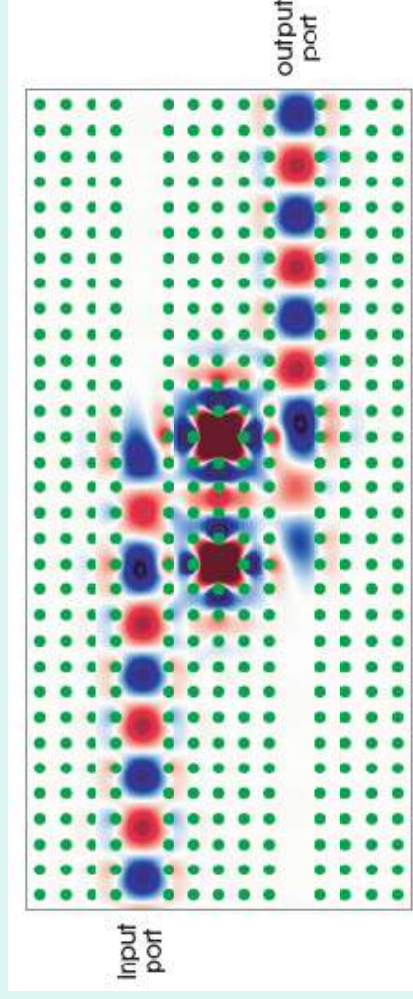


# Point, Line, and Surface Defects:

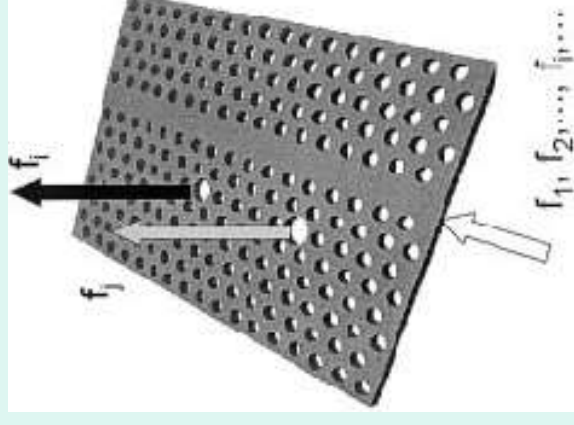


# Point defect: Cavity

Coupler

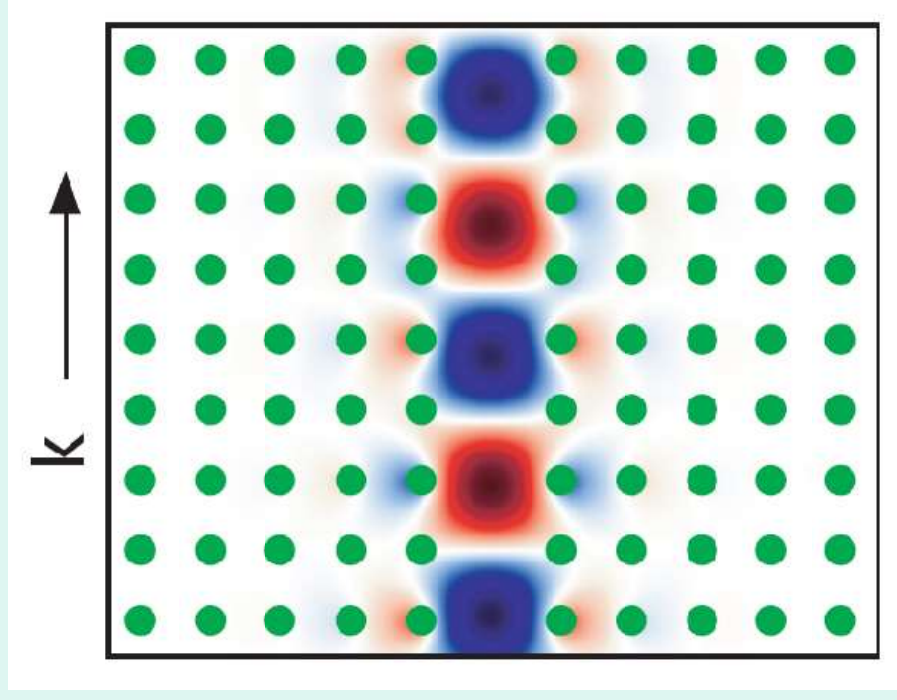
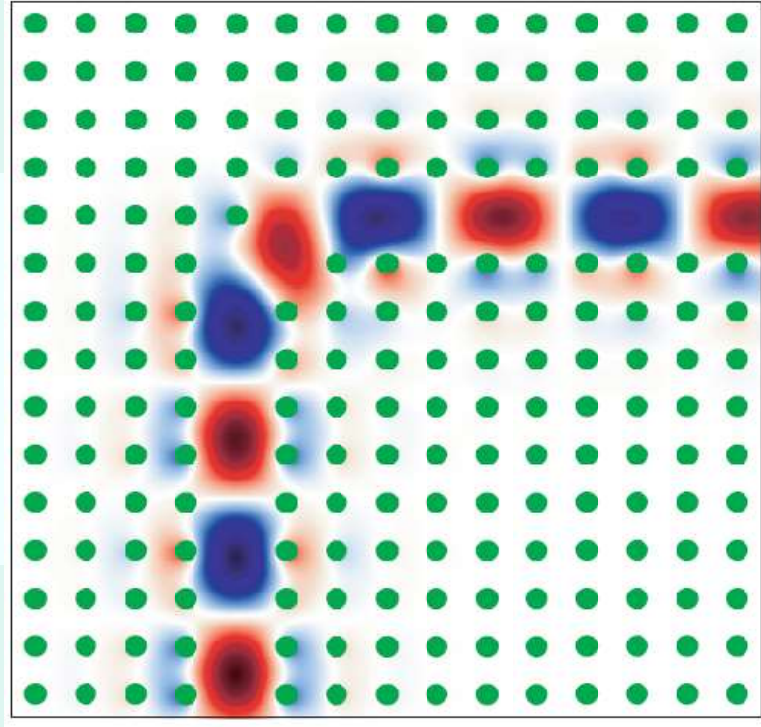


Filter



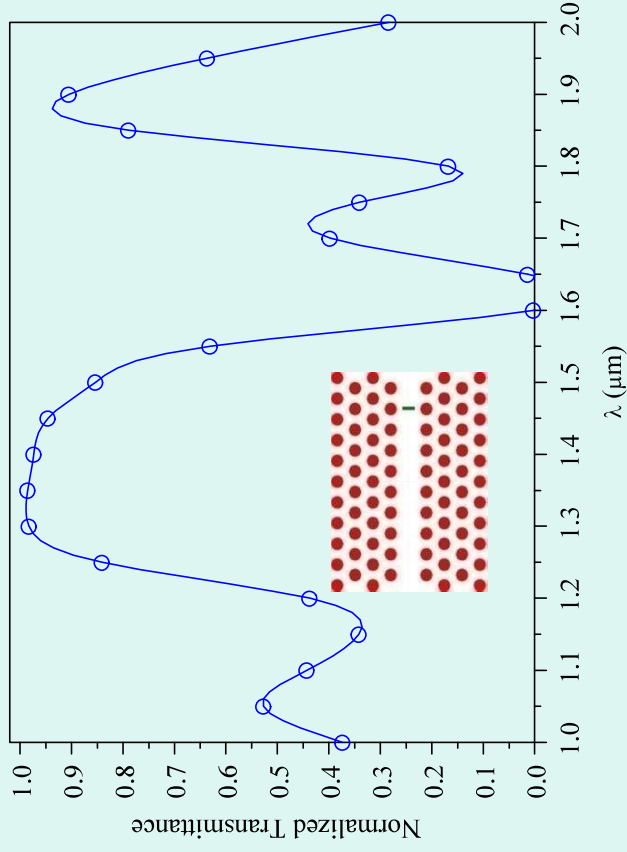
# Line-defect : waveguide

A waveguide bend

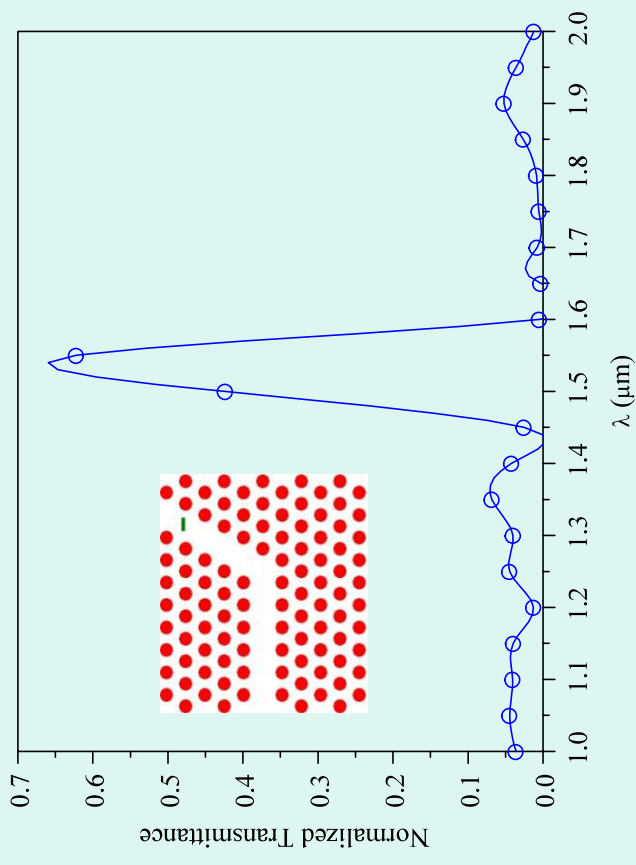


# Transmittance spectra for waveguides: (1)

Straight waveguide, **Air-holes**,  
Triangular, TM,  $\epsilon_r=11.9$ ,  
( $ra=0.3$ ),  $a=0.35$ ,



S-Bend waveguide, **Air-holes**,  
Triangular, TM,  $\epsilon_r=11.9$ ,  
( $ra=0.3$ ),  $a=0.35$ ,

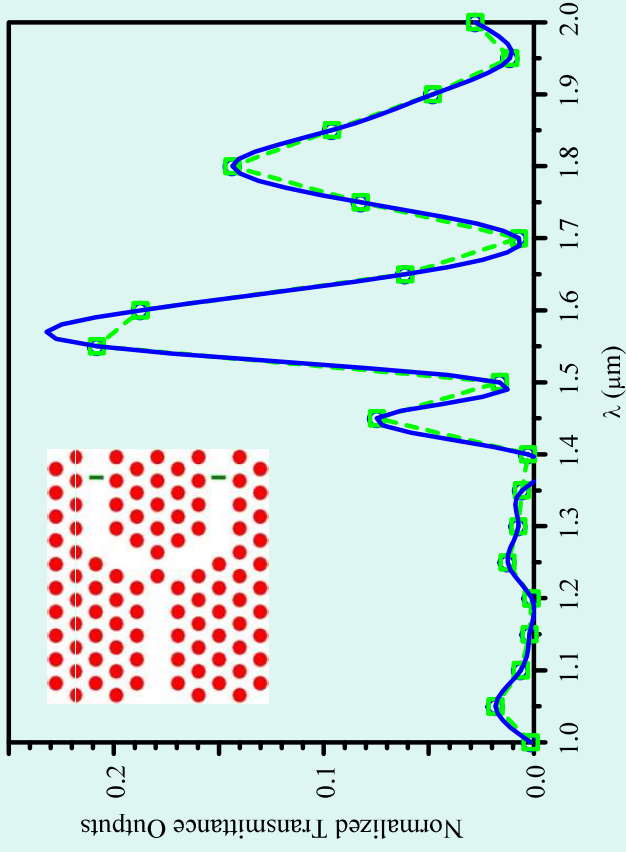




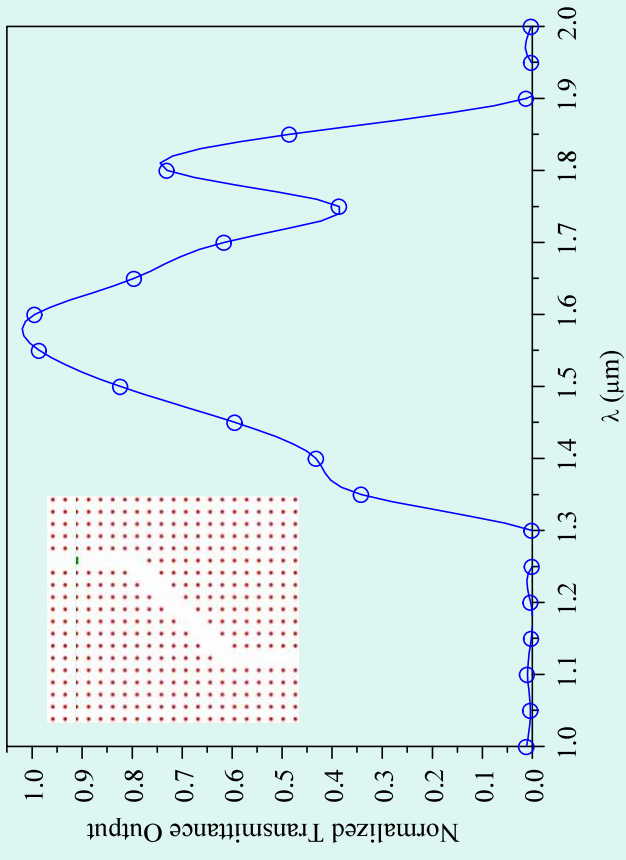
# Transmittance spectra for waveguides: (2)

Y-Branch (with small hole at the center), **Air-holes**, Triangular, TM,

$\epsilon_r=11.9$ , ( $r/a=0.3$ ),  $a=0.35$ ,



S-Bend waveguide, **Pillar**, Square, TE,  
 $\epsilon_r=12.96$ , ( $r/a=0.15$ ),  $a=0.6$ ,

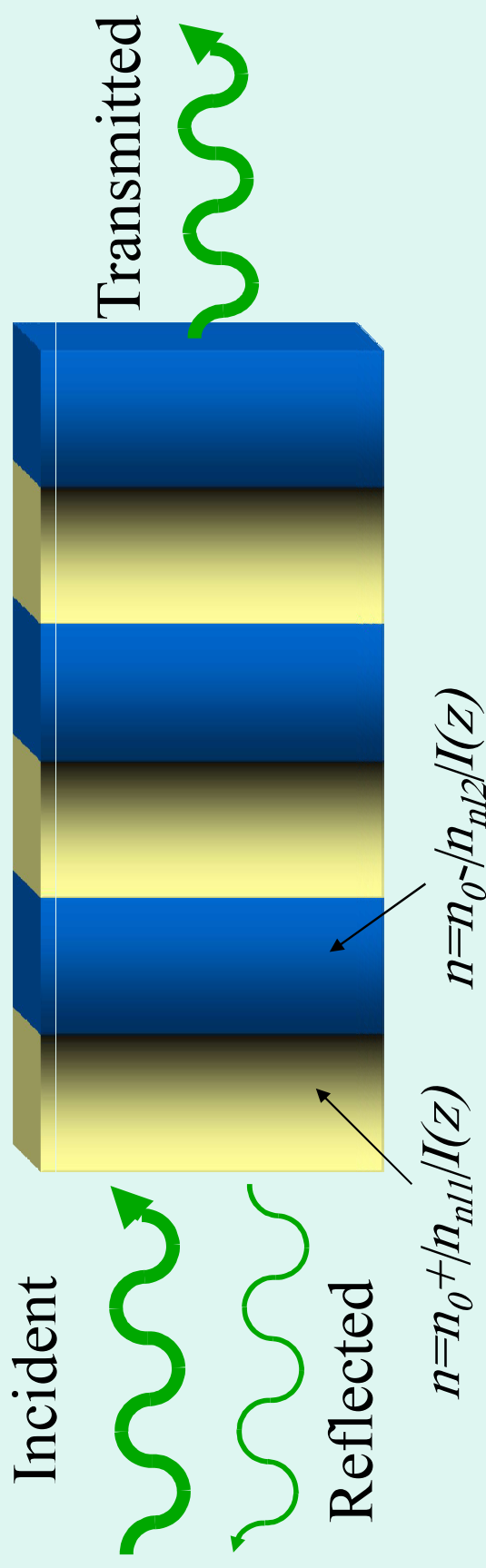


## **2. 3. Computational tools:**

- 1. Plane wave Expansion (PWE)**
- 2. Finite-Difference Time Domain (FDTD)**

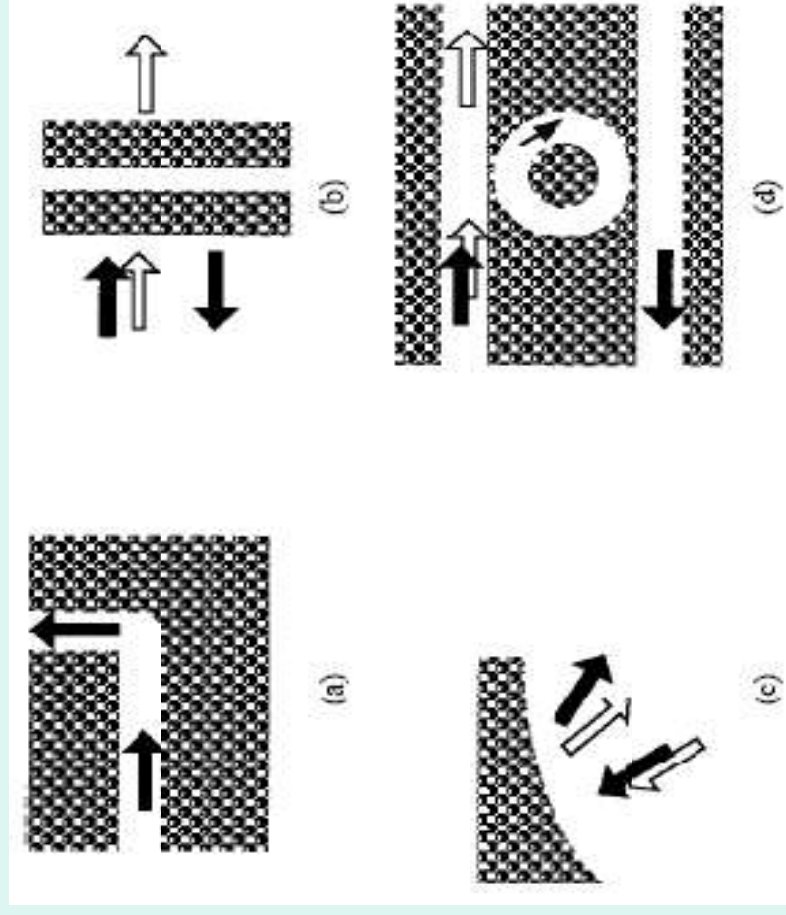
# Nonlinear Devices

Behavior depends on intensity of light



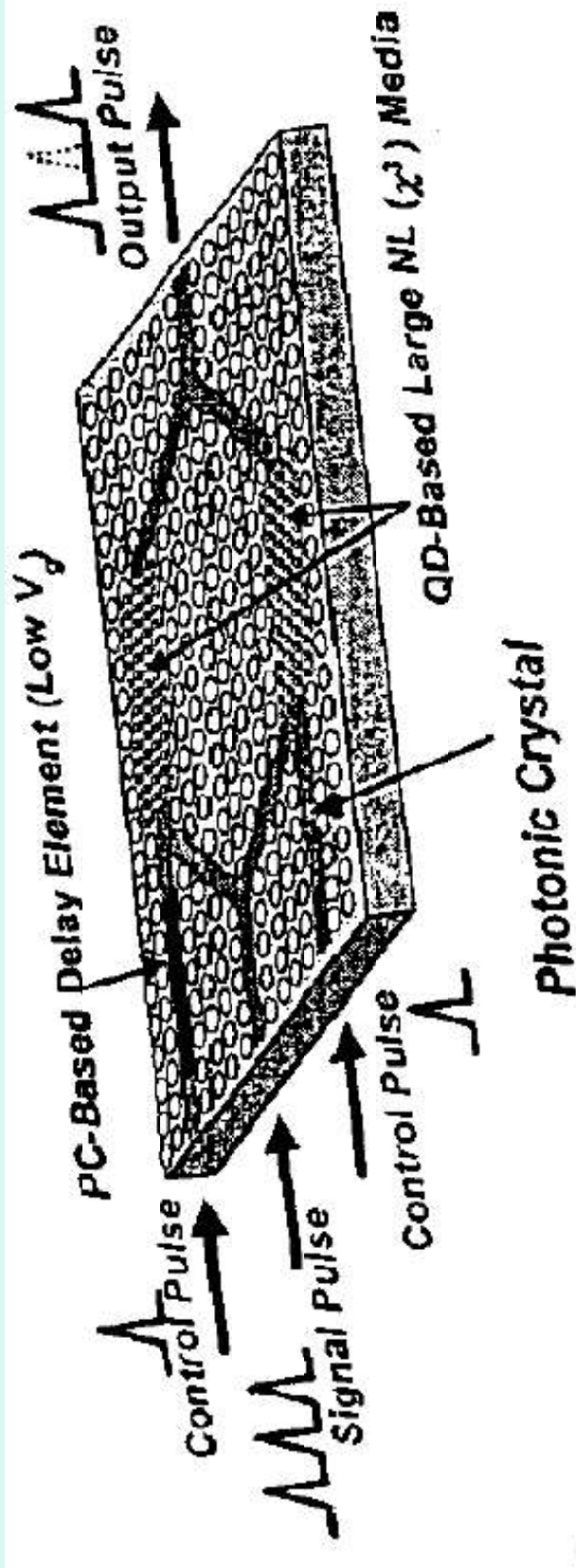
# Application of two-dimensional Photonic Crystals:

- a) Short bends in waveguides
- b) Filters based on cavity modes select only the resonant frequency
- c) Diffraction of a photonic crystal disperses different wavelengths impinging in the same direction
- d) Add/drop filter can be based on waveguides coupled with one or two resonant structures



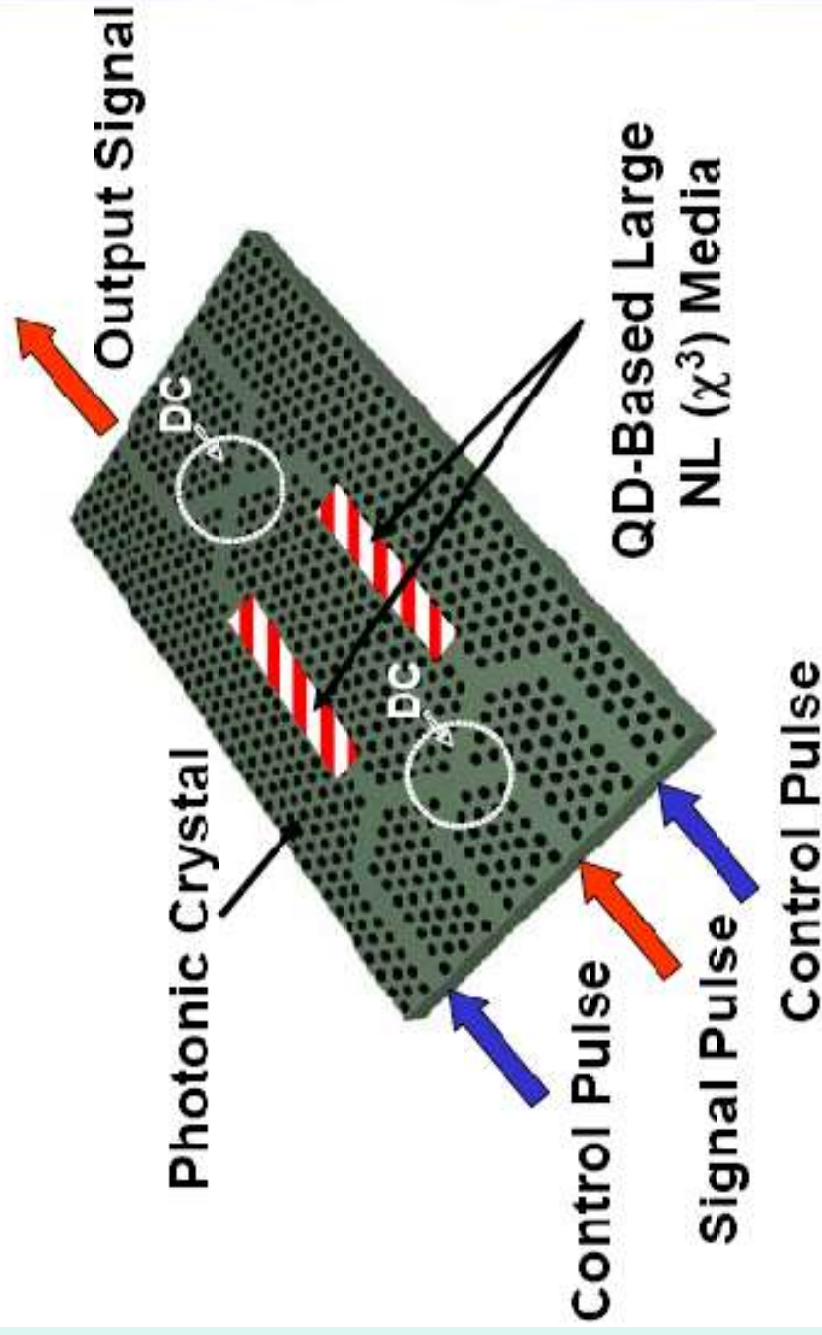
# PC-SMZ All-Optical Switch

(Photonic Crystal-Symmetrical Mach-Zehnder)



[2003][Kiyoshi Asakawa]

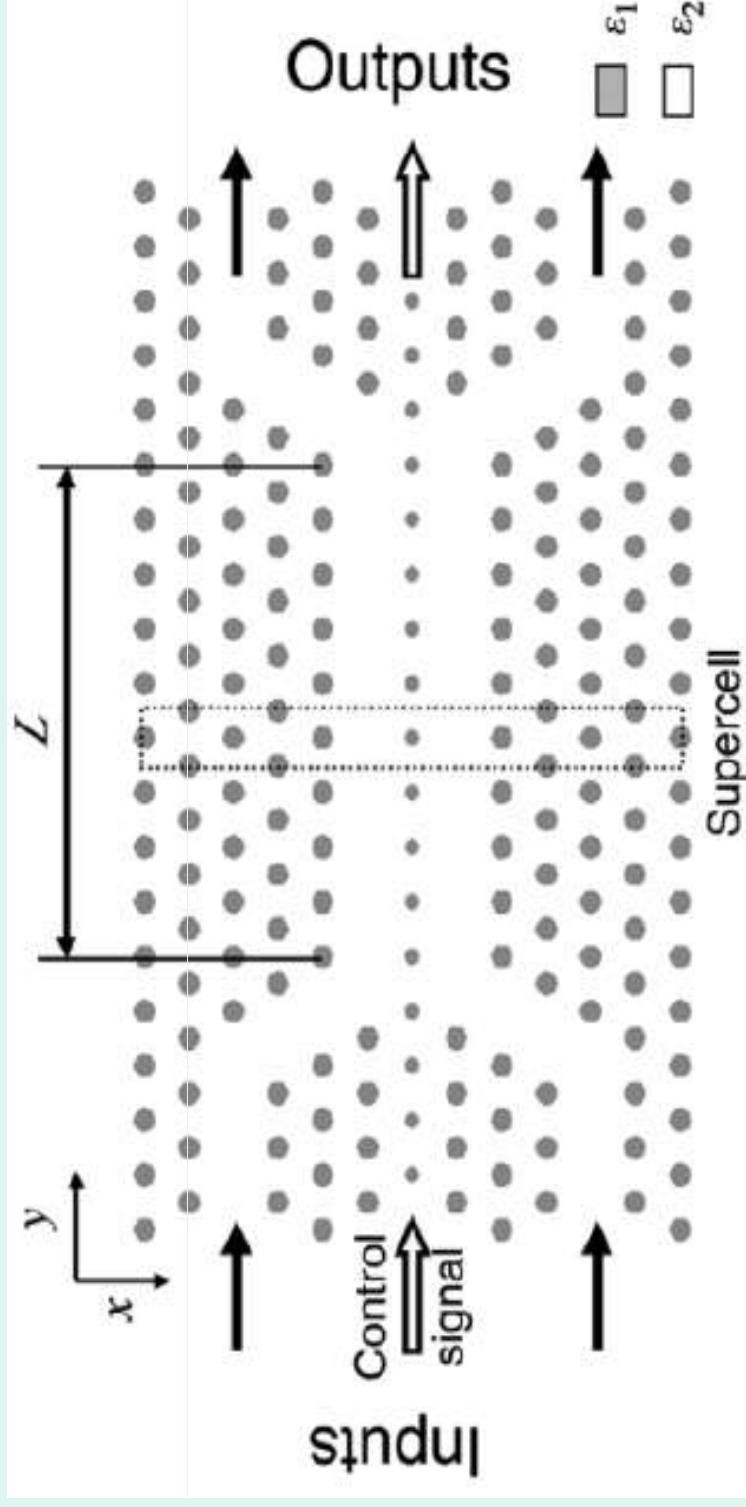
# PC-SMZ



[2005][Yoshinori Watanabe, & etc.]

# All-Optical Switching Based on a 2-D Nonlinear Photonic Crystal Directional Coupler

[2004][Francisco Cuesta-Soto, & etc.



# 1.3/1.55 um optical directional coupler by photonic crystal with a defect shifting design

[2005][Wen-Kai Wang, & etc.]

refractive index of  $\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.31}\text{As}$ , which is 3.24 and 3.13 for the wavelength 1.3  $\mu\text{m}$  and 1.55  $\mu\text{m}$  respectively,

Fig. 1. The propagation of light simulated by the FDTD method in the square-shaped lattice PC directional coupler for wavelengths of 1.3 and 1.55  $\mu\text{m}$ .

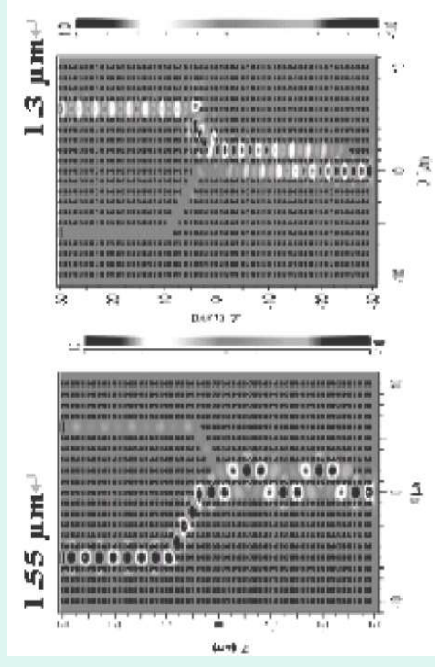
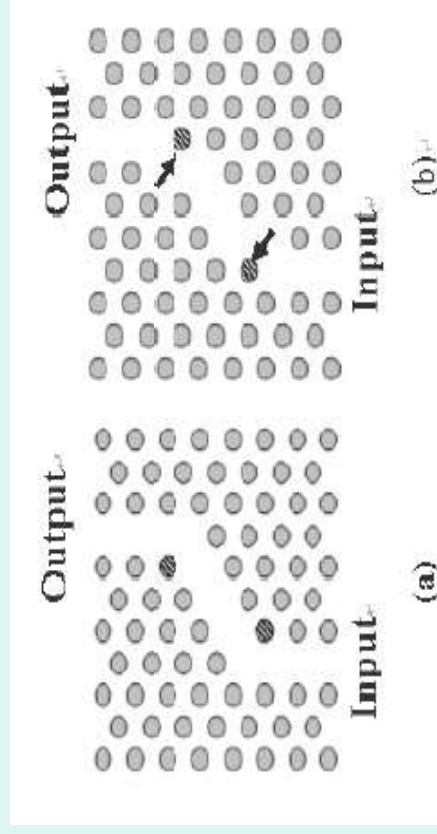
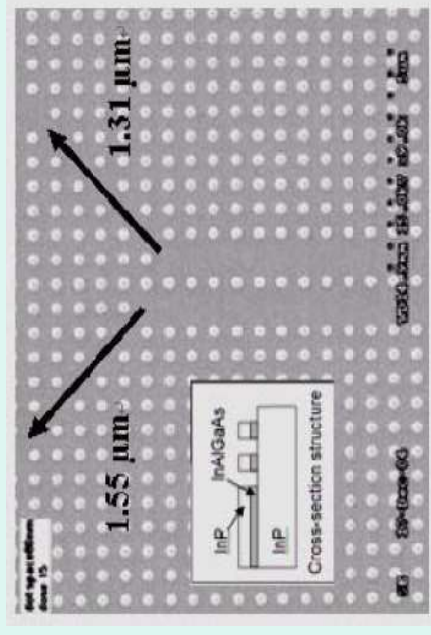


Fig. 2. The SEM image of the square-shaped lattice PC directional coupler cell.



M. A. Mansouri

Photonic Crystals

25



## مروری بر روش های عددی مورد استفاده در تحلیل ادوات فوتونی

- 1-Palme wave Expansion (PWE)
- 2-Finit-Difference Time Domain (FDTD)
- Beam propagation Method (BPM)

- (دقیق ترین، قدرتمندترین و عمومی ترین روش عددی برای تحلیل انتشار الکترومغناطیسی در ادوات فوتونی و نور مجتمع، روش FDTD است.)

- **مهمترین عیبی آن، حجم وسیع محاسبات است که زمان محاسبات بسیار زیاد است.**

- **عیب دیگر آن، نویز عددی پاشندگی است که برای مقابله با آن ابعاد مش را باید حدود ۴۰/۱ طول موج در نظر گرفت.)**

## 1-Plane wave Expansion (PWE):

2D Maxwell's equations, for a TE-polarized field:

$$\frac{1}{\varepsilon(\rho)} \left[ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right] E_z(\rho) + \left( \frac{\omega}{c} \right)^2 E_z(\rho) = 0 \quad (1)$$

Where:

$\varepsilon(\rho)$  is the position-dependent material dielectric constant,  
 $\rho$  is the coordinates in the plane perpendicular to the rods,  
 $c$  is the speed of light in free space,  
 $\omega$  is radian frequency,  
and  $E_z(\rho)$  is the electric field.

## Using Bloch theorem:

$$E_z(\boldsymbol{\rho}) = \sum_{\mathbf{G}} A(\mathbf{k} + \mathbf{G}) \exp[ j(\mathbf{k} + \mathbf{G}) \cdot \boldsymbol{\rho} ] \quad (2)$$

- Where:
  - $A$  is the vector amplitude of the plane wave (or relative electric field envelope function),
  - $\mathbf{k}$  is the wave vector in the first Brillouin zone of the photonic crystal lattice, and
  - $\mathbf{G}$  is the reciprocal lattice vector.

**The inverse of the dielectric function can be expressed in terms of Fourier series:**

$$\frac{1}{\varepsilon(\boldsymbol{\rho})} = \sum_{\mathbf{G}'} \left( \frac{1}{\varepsilon} \right)_{\mathbf{G}'} \exp[j(\mathbf{G}' \cdot \boldsymbol{\rho})] = \sum_{\mathbf{G}'} \psi(\mathbf{G}') \exp[j(\mathbf{G}' \cdot \boldsymbol{\rho})] \quad (3)$$

$\psi$  is the inverse relative permittivity envelope function.

Substituting (2) and (3) in (1) yields:

$$\sum_{\mathbf{G}'} (\mathbf{k} + \mathbf{G}) \cdot (\mathbf{k} + \mathbf{G}') \psi(\mathbf{G} - \mathbf{G}') A(\mathbf{k} + \mathbf{G}') = \left( \frac{\omega}{c} \right)^2 A(\mathbf{k} + \mathbf{G}), \quad (4)$$

Equation (4) is a standard eigen value equation for a symmetric matrix

## 2- Finit-Difference Time Domain (FDTD):

Maxwell's equations for a TE-polarized light propagating in such a 2DPhC structure:

$$-\mu_0 \frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial y}$$

$$-\mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t} = -\frac{\partial E_z}{\partial x}$$

$$\epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y}$$

## 2- Finit-Difference Time Domain (FDTD):

With boundary condition PML ( Perfectly Matched Layer)

$$H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j+\frac{1}{2}) = H_x^{n-\frac{1}{2}}(i, j+\frac{1}{2}) - \frac{\Delta t}{\mu} \left[ \frac{E_z^n(i, j+1) - E_z^n(i, j)}{\Delta y} \right]$$

$$H_y^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j) = H_y^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j) + \frac{\Delta t}{\mu} \left[ \frac{E_z^n(i+1, j) - E_z^n(i, j)}{\Delta x} \right]$$

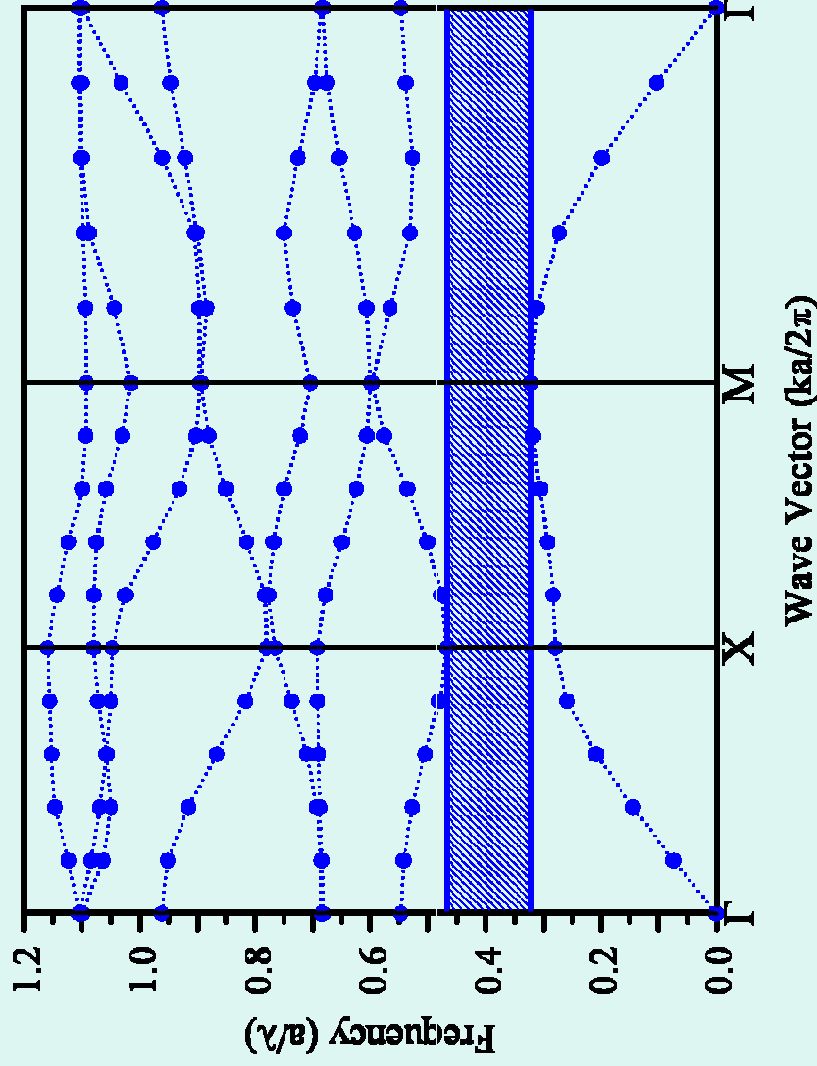
$$E_z^{n+1}(i, j) = E_z^n(i, j) + \frac{\Delta t}{\epsilon_0 \epsilon(i, j)} \times \left[ \frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j) - H_y^{n-\frac{1}{2}}(i-\frac{1}{2}, j)}{\Delta x} - \frac{H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j+\frac{1}{2}) - H_x^{n-\frac{1}{2}}(i, j-\frac{1}{2})}{\Delta y} \right]$$

**CFL constraint:  $\Delta t$ , must be smaller than or equal to**

$$1/c\sqrt{1/\Delta x^2 + 1/\Delta y^2}$$

$$\Delta x = \Delta y = 0.06 \mu\text{m}, \quad c \cdot \Delta t = 0.03 \mu\text{m}.$$

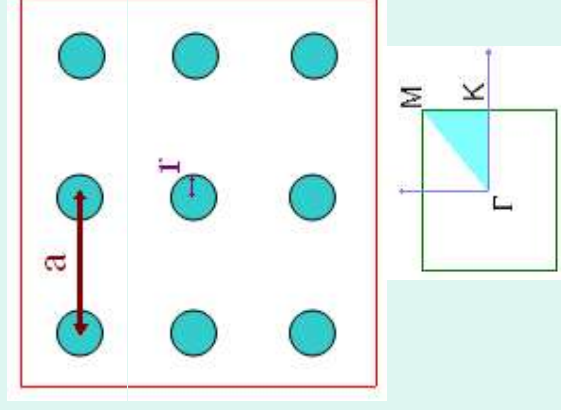
### 3-3) Band Structure by PWE method:



$(\epsilon_r = 12.96)$  or  $n_r = 3.6$

$a = 0.6 \mu\text{m}$

$r = 0.15a = 0.09 \mu\text{m}$



Band gap is between  $0.32 < a / \lambda < 0.46$  or  $1.3 \mu\text{m} < \lambda < 1.875 \mu\text{m}$ .

# Nonlinear Refractive Index

- Optical Kerr effect:

$$n \equiv n_0 + n_2 I$$

$$n_2 = \frac{3\chi_3}{4n^2 c \epsilon_0} \quad (\text{nonlinear refractive index})$$

$$k = \frac{n\omega}{c} = \frac{n_0\omega}{c} + \frac{n_2 I \omega}{c} = k_0 + \Delta k$$

$$\Delta\phi = \Delta k L = \frac{n_2 I \omega}{c} L = \frac{2\pi n_2 I L}{\lambda_0}$$

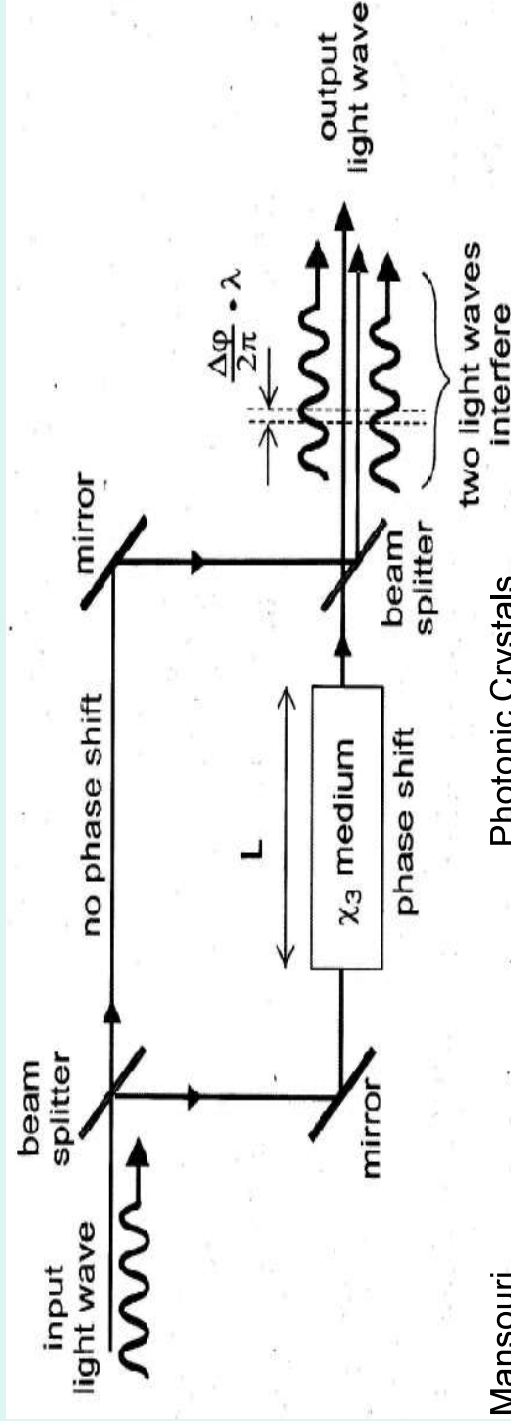


# Optical Switching

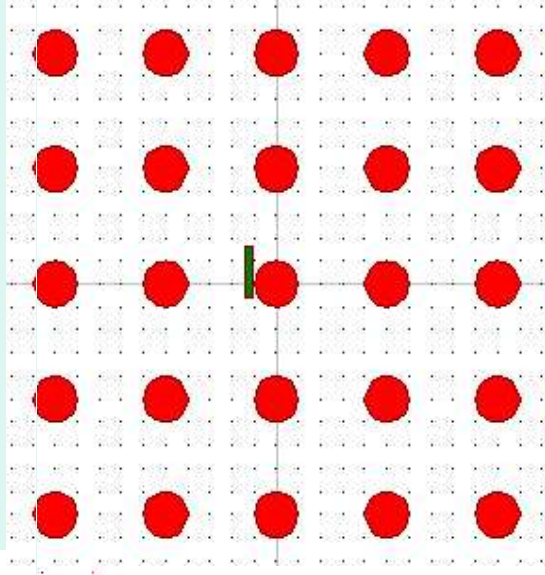
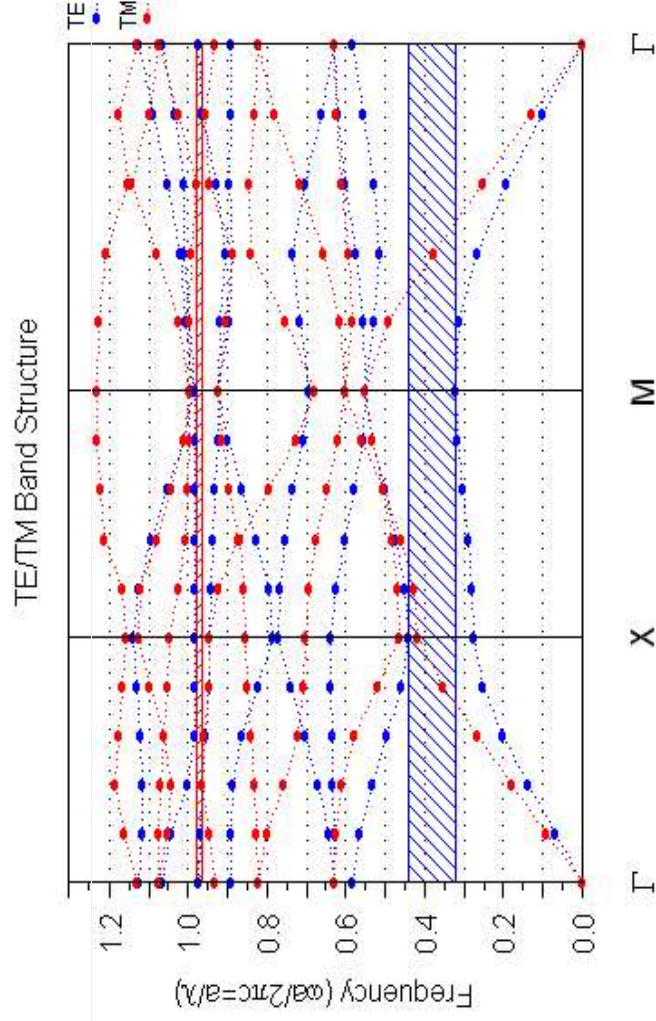
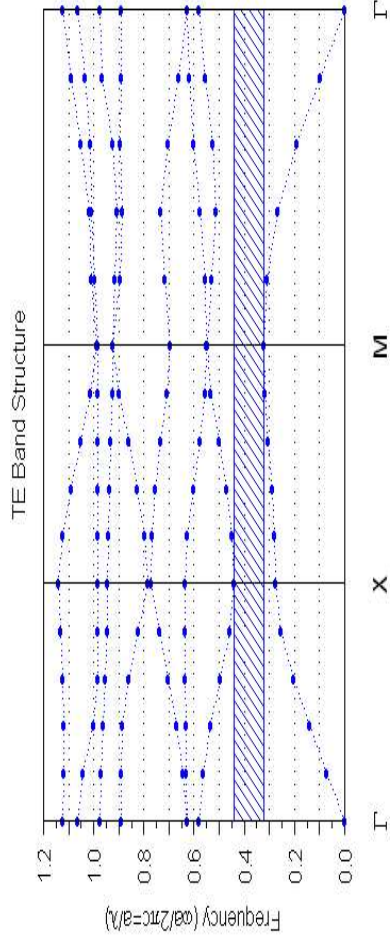
- **Self-Phase Modulation** in one arm of a Mach-Zehnder Interferometer:

$$\pi = \frac{n_2 I_\pi 2\pi L}{\lambda_0}$$

$$I_\pi = \frac{\lambda_0}{2n_2 L} \quad (\text{switching intensity})$$



# 2D Cubic XZ



# Beam PROP

- موتور شبیه سازی برای طراحی قطعات موجبر نوری و مدارات مجتمع (محاسبه انتشار امواج نور در هندسه موجبر دلخواه)
- از تکنیکهای پیشرفته **تفاضل محدود** انتشار باریکه برای شبیه سازی استفاده می کند.
- هم برای تحقیقات در دانشگاهها و هم برای محیط صنعتی مناسب است.
- اطلاعات اصلی و کلیدی:
  - ۱- توزیع ضریب شکست
  - ۲- میدان موج ورودی

# Full WAVE

- موتور شبیه سازی ایده آل، برای طراحی قطعات پیچیده فوتونیک
- استفاده از روش **FDTD** برای شبیه سازی
- آنالیز قطعاتی که نمی توانند با تکنیک هایی همچون روش انتشار بیم موثر (**EBPM**) صورت پذیرد.

# Grating MOD

- این نرم افزار به آنالیز و مدل سازی قطعاتی کمک میکند که گریٹینگ در آن بکار رفته و در نتیجه برای انواع مختلف فیلترها بکار میرود.
- به آسانی با ابزارهای دیگر شبیه سازی **RSOFT** کار خواهد کرد.

# Band SOLVE

- BandSOLVE، نرم افزار جامع و موتور شبیه سازی برای تولید و آنالیز ساختارهای باند فوتونیک است.
- هدف BandSOLVE تولید ساختارهای باند برای ساختارهای شکاف باند فوتونیک نظیر موجبرهای کریستال فوتونیک 3D,2D است.
- علاوه بر آن برای ساختارهای فیبر، مثل فیبرهای کریستال فوتونیک و فیبرهای شکاف باند فوتونیک بکار می رود.

# روش تولید ساختار بانده در BandSOLVE

- 1- رسم یک طرح کریستال فوتونیک
- 2- انتخاب BandSOLVE در ابزار طراحی
- 3- انتخاب روش عددی: (PWE) یا (FDTD)
- 4- انتخاب تعداد بعد برای شبیه سازی
- 5- تعریف خصوصیات شبکه شامل بردارهای واحد اصلی، مرکز شبکه و ابعاد ابرسلول
- 6- انتخاب رزولوشن عددی شبکه و پارامترهای عددی دیگر

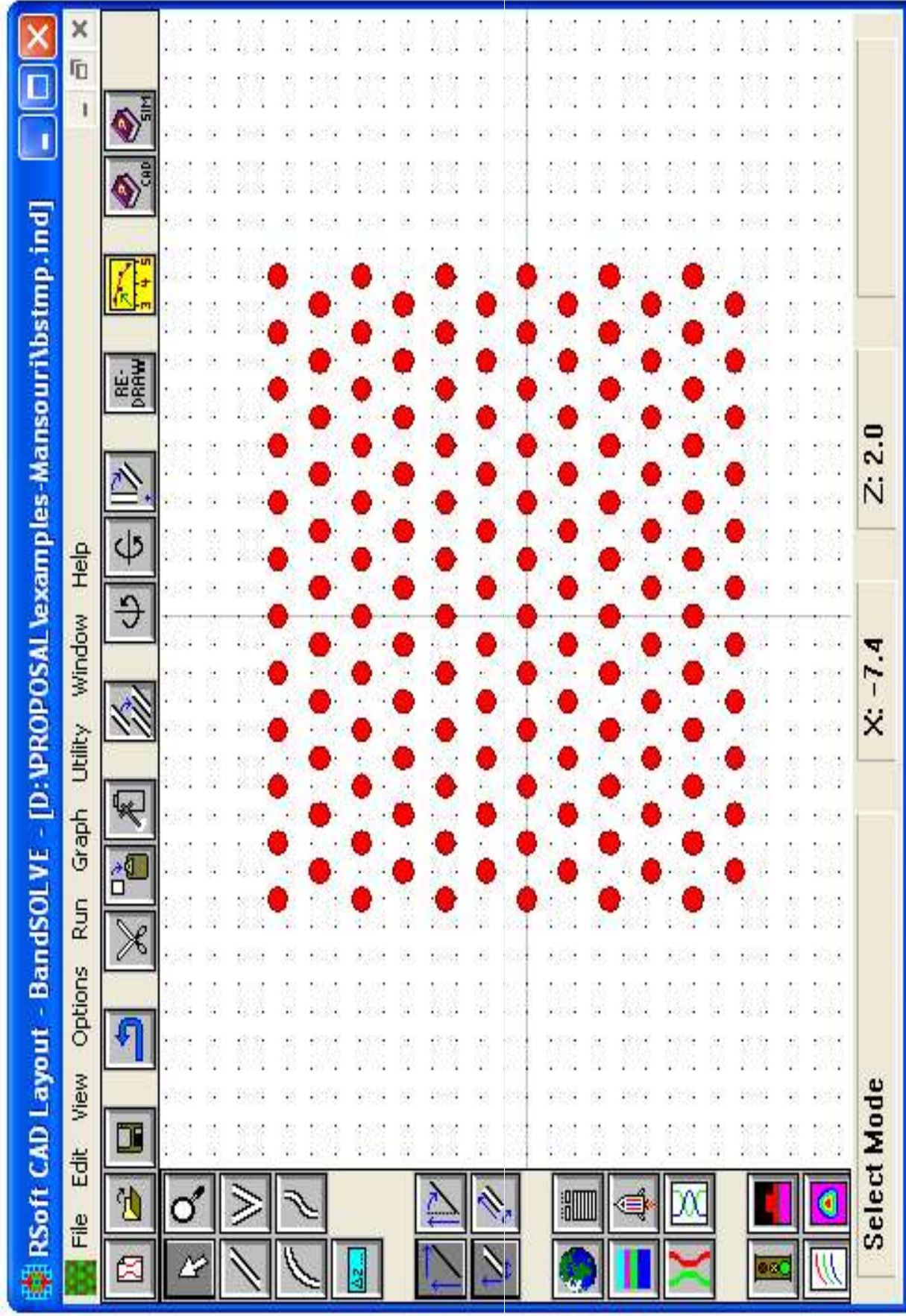
1-Plane wave Expansion(PWE)

2-Finit-Difference Time Domain(FDTD)

# دروند تولید ساختار بانده در BandSOLVE

- 7- انتخاب تعداد باندها
- 8- انتخاب بردار موج  $k$ -path از میان ناحیه بریلیون بر پایه مسیرهای اتوماتیک یا تعریف شده توسط کاربر
- 9- انتخاب پلاریزاسیون محاسبات
- 10- فعال کردن هر خصوصیت ویژه از قبیل خروجی مودشکلها، محاسبات مربوط به ضرایب شکست مؤثر یا سرعت گروه و...
- 11- شروع محاسبات





# BandSOLVE 1.2 Simulation Parameters

## Lattice Numerical Properties

Sim Method:  Plane Waves  FDTD

Dimensions:  1  2 (X-Z)  3 (X-Y)

Supercell dims: [a, b, c]

Lattice center: [a, b, c]

Enforce inversion symmetry

## Lattice vectors/domain

Vec. a:

Vec. b:

Vec. c:

Use defaults

Current:  Default:  Steps:  Use defs:

da:  db:  dc:

grid\_size\*(F)

Advanced ...  Power of 2 Steps

Eigenvalue tolerance:

Eigenvalue threshold:

Number of bands:

View Domain

View First BZ

FDTD Settings ...

## K vector path

KPath source:

Lattice type:

KPath filename:

KPath divisions:

KPath offset: [x, y, z]

Orthogonalize  Low symmetry

## Polarization

TE  TM  Both/Hybrid

Output Prefix:

Estimated mem.

Output ...

Save Settings

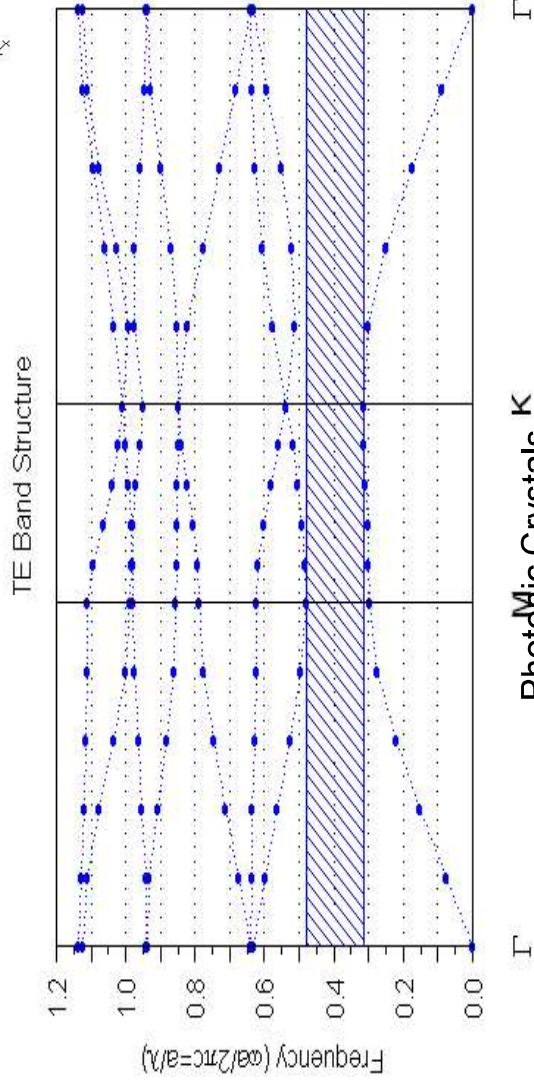
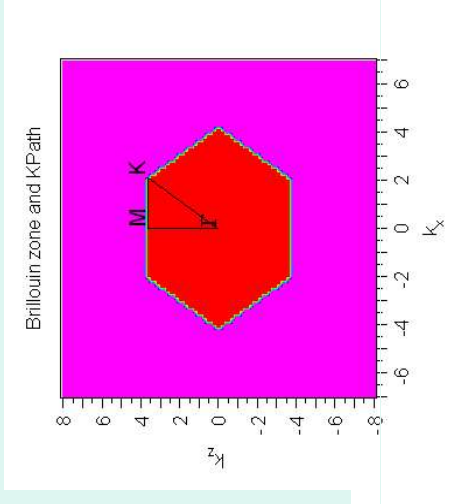
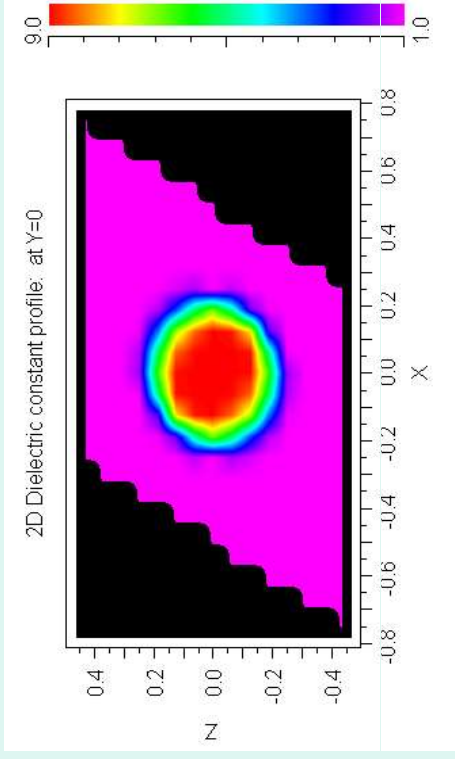
Display ...

OK

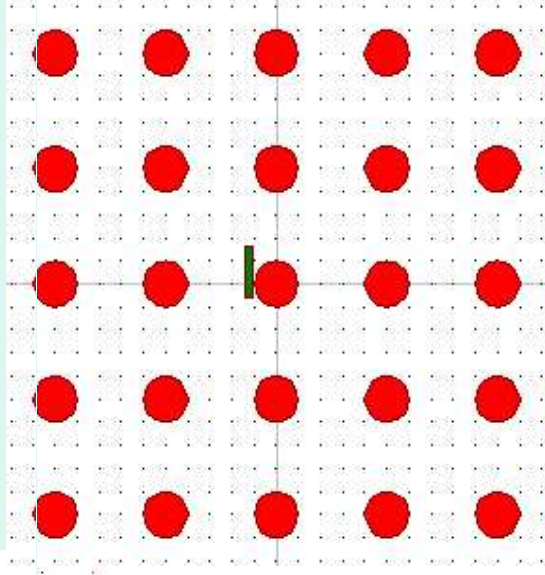
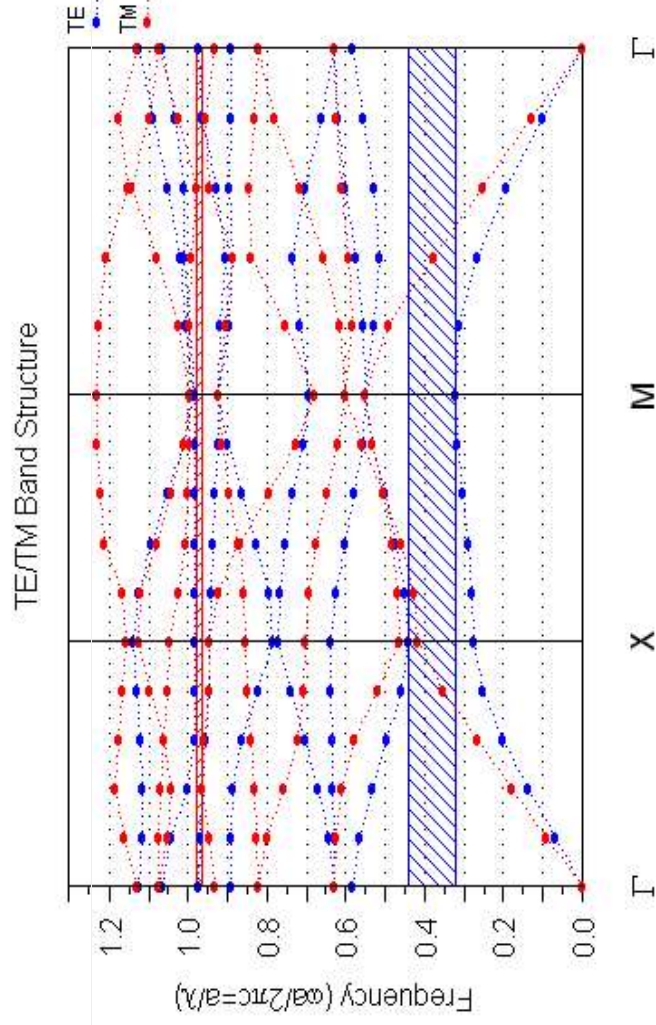
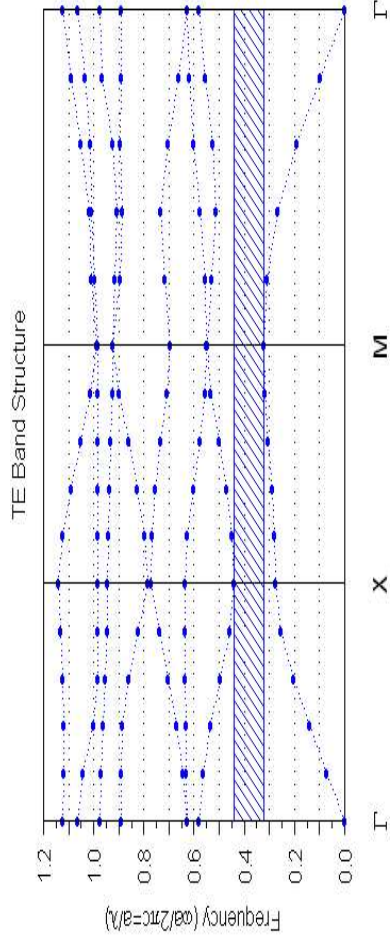
Symbols ...

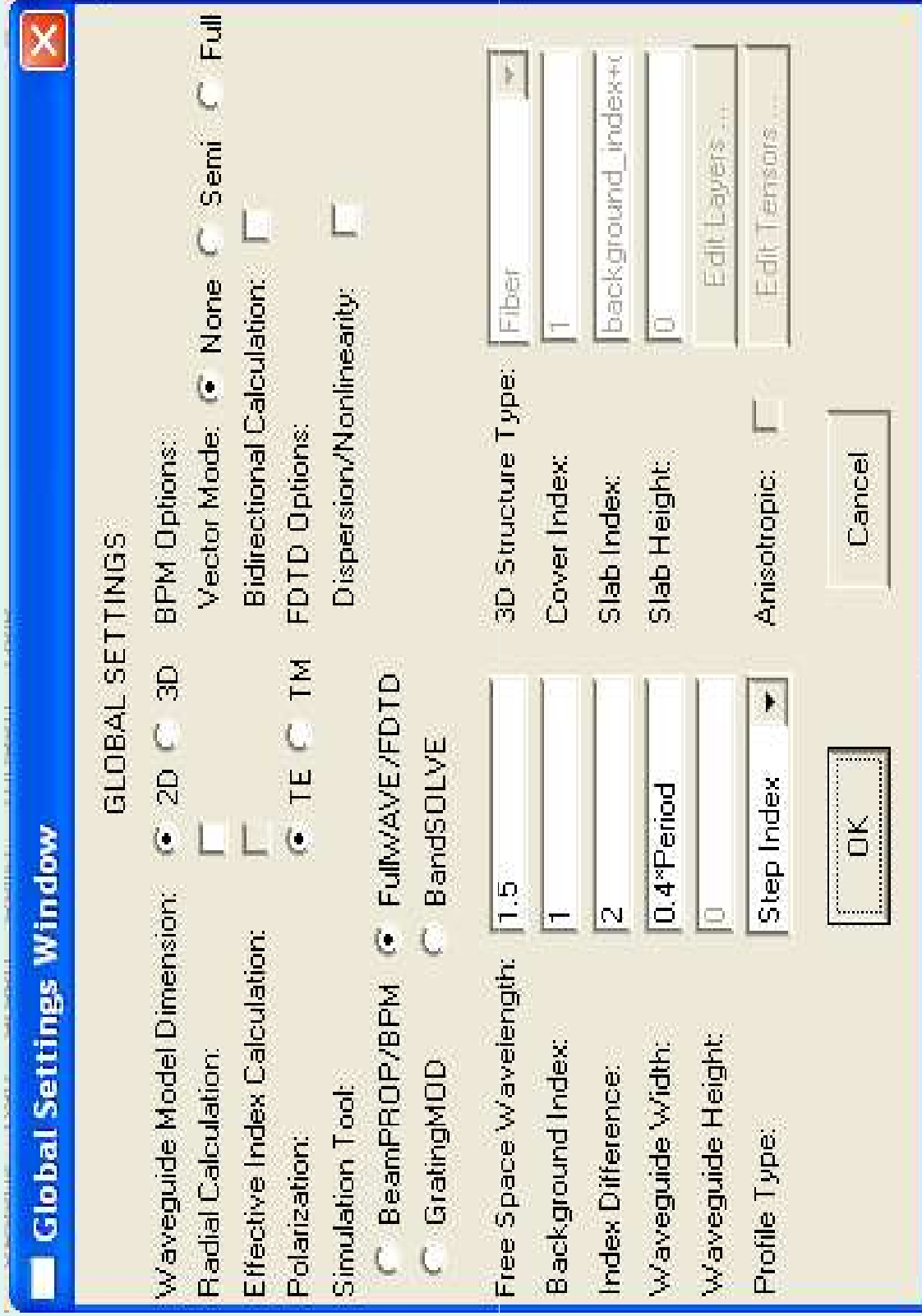
Cancel

# نتایج شبیه سازی 2D Hex xz



# 2D Cubic XZ







# Fullwave Simulation Parameters



X

Y

Z

Domain Min:

Domain Max:

Grid Size:

PML Width:

PML Refl:

Current Value	Default Value	Use Defs
-bounda	3.9	<input type="checkbox"/>
(0.5*NX)	3.9	<input type="checkbox"/>
0.05	0.01	<input type="checkbox"/>
0.5		
1e-008		

Current Value	Default Value	Use Defs
0	0	<input checked="" type="checkbox"/>
0	0	<input checked="" type="checkbox"/>
0.0625	1	<input type="checkbox"/>
0.5		
1e-008		

Current Value	Default Value	Use Defs
CenterZ	-1.9	<input type="checkbox"/>
CenterZ	1.9	<input type="checkbox"/>
0.05	0.01	<input type="checkbox"/>
0.5		
1e-008		

Time Grid

Time Step:	grid_size/2
Stability Limit:	0.03535533806
Stop Time:	20
Slice Time:	fdtd_stop_time
Update Time:	fdtd_time_step*10
Monitor Time:	fdtd_time_step

(All times are cT in units of um)

Default Launch

Excitation:	CW
Ramp/Pulse Time:	lambda
Source Offset:	0
Launch ...	Output Prefix:
Symbols ...	Output ...
Advanced ...	Advanced ...
Cluster Settings ...	Cluster Settings ...

Estimated Time:  
0.031 min

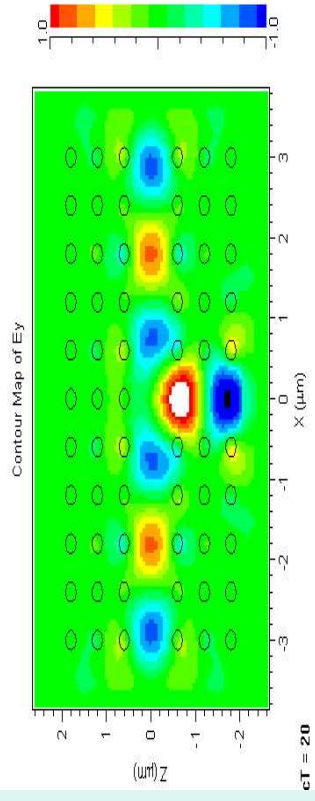
Estimated Mem:  
5.9 MB

Save Settings

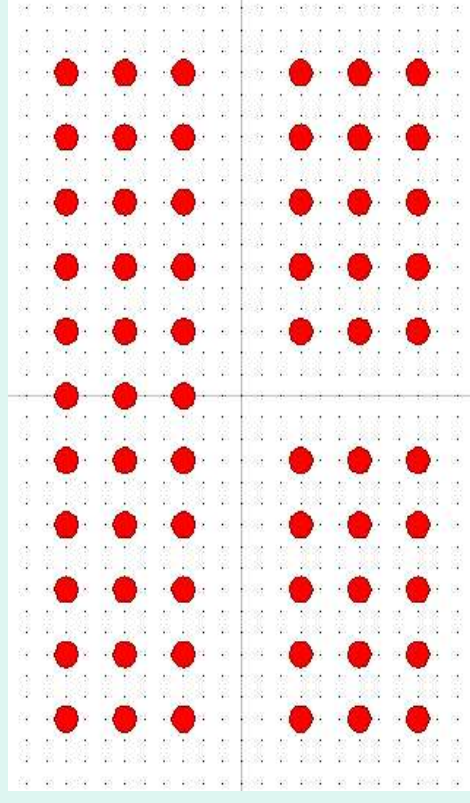
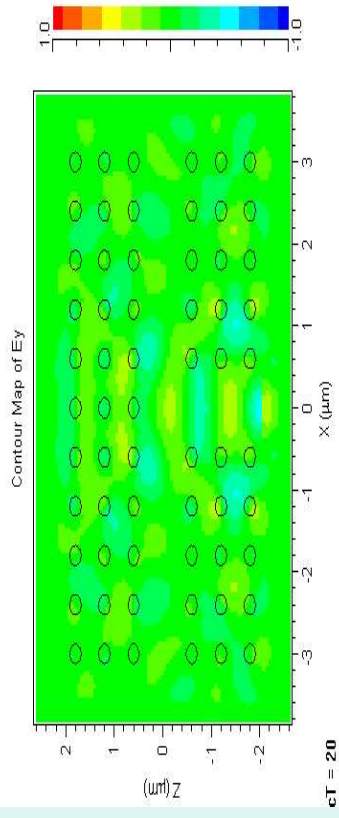
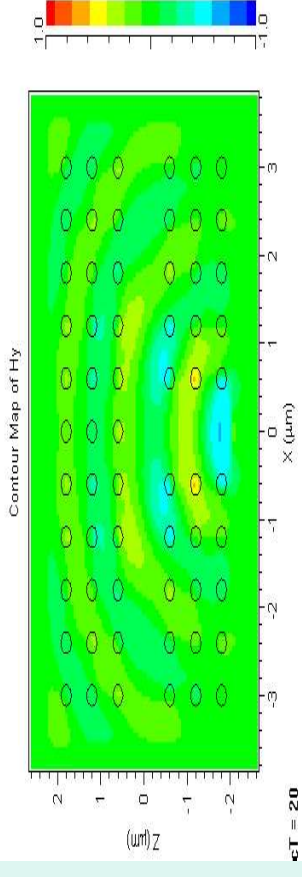
OK

Cancel

طول موج نور ورودی =  $1.5 \mu\text{m}$  (TE)

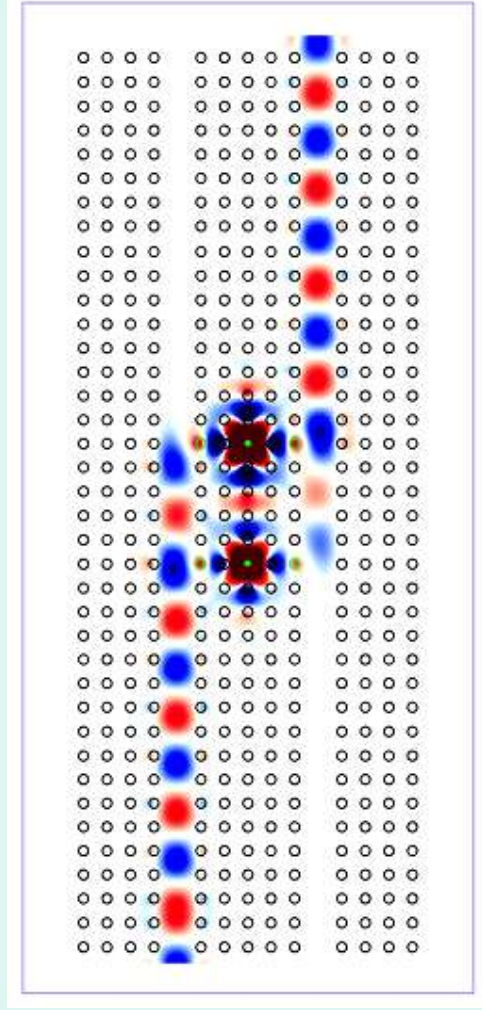
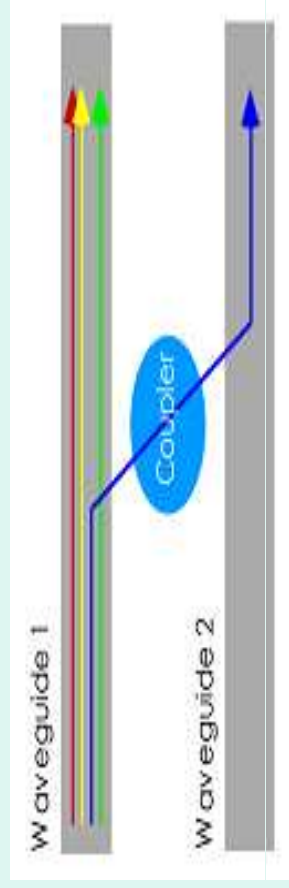


طول موج نور ورودی =  $1.5 \mu\text{m}$  (TM)



M. A. Mappou# طول موج نور ورودی (TE) Photonic Crystals

# Add-Drop Switch







M. A. Mansouri

Photonic Crystals

50