

# بلورهای فوتونی photonic crystals

## فصل اول: مقدمه

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

گروه مهندسی الکترونیک - محمدعلی منصوری بیرجندی

[mansouri@ece.usb.ac.ir](mailto:mansouri@ece.usb.ac.ir)

[mamansouri@yahoo.com](mailto:mamansouri@yahoo.com)

یا نُورَ النُّورِ، یا مَنْوِرَ النُّورِ، یا خَالِقَ النُّورِ،

یا مُدَبِّرَ النُّورِ، یا مُقَدِّرَ النُّورِ،

یا نُورَ کُلِّ نُورِ،

یا نُورًا قَبْلَ کُلِّ نُورِ، یا نُورًا بَعْدَ کُلِّ نُورِ،

یا نُورًا فَوْقَ کُلِّ نُورِ، یا نُورًا لَيْسَ كَمِثْلِهِ نُورٌ.

# Overview

---

1. Marking Scheme
2. References
3. Motivation
4. **Topics:** Photonic crystals, Plasmonics, Metamaterials, Graphene, ...

# Marking

---

<input type="checkbox"/> Seminar:	20%
<input type="checkbox"/> Homework:	10%
<input type="checkbox"/> Final Exam:	70%

# References

## □ Main references

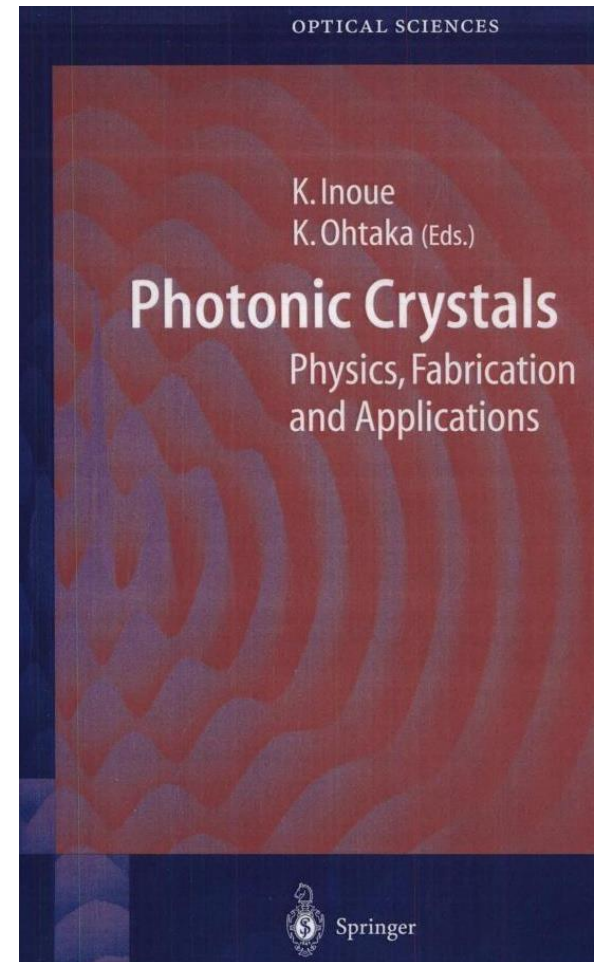
### ➤ Textbook:

● **Kuon Inoue, and Kazuo Ohtaka**

*Photonics Crystals: Physics,  
Fabrication and Applications*

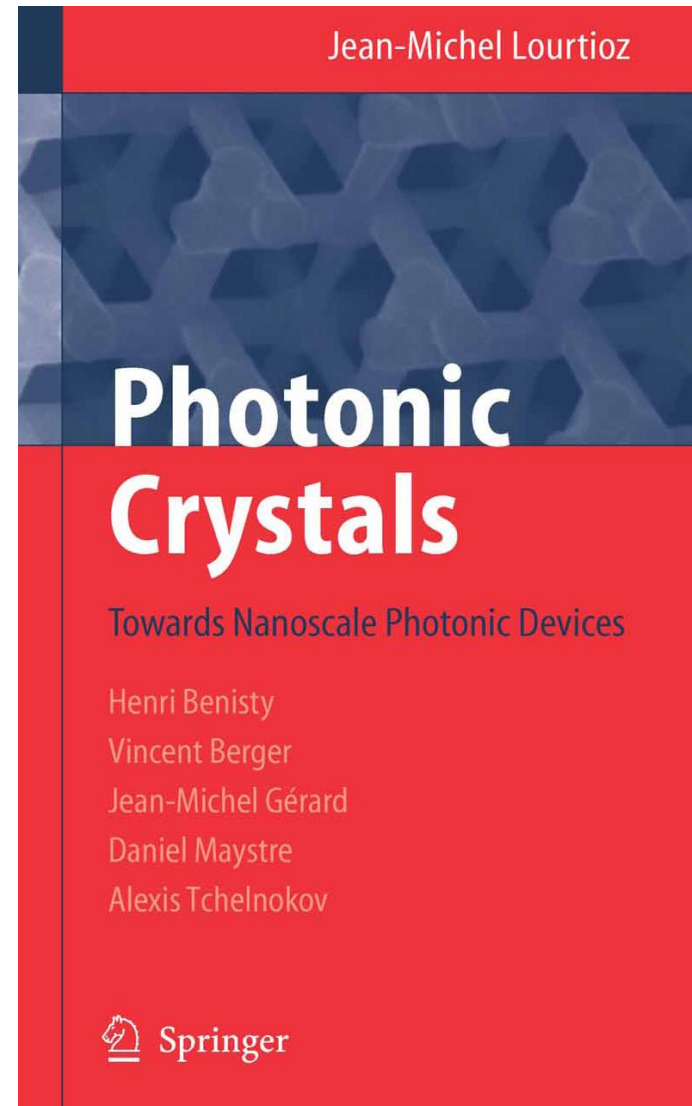
Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004

● **Lecture notes**

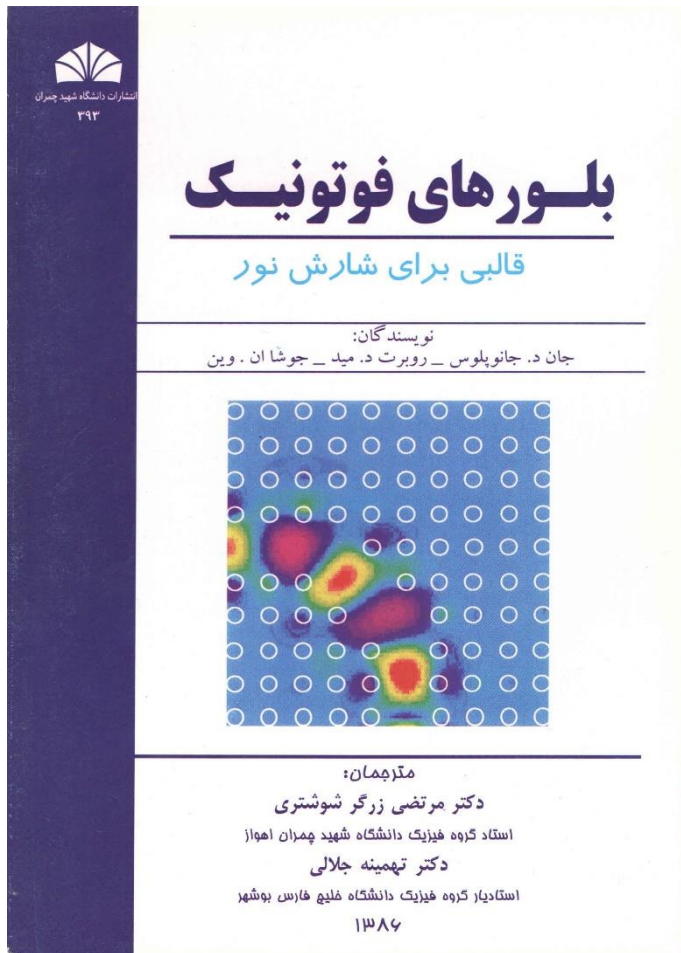


# Other References (1)

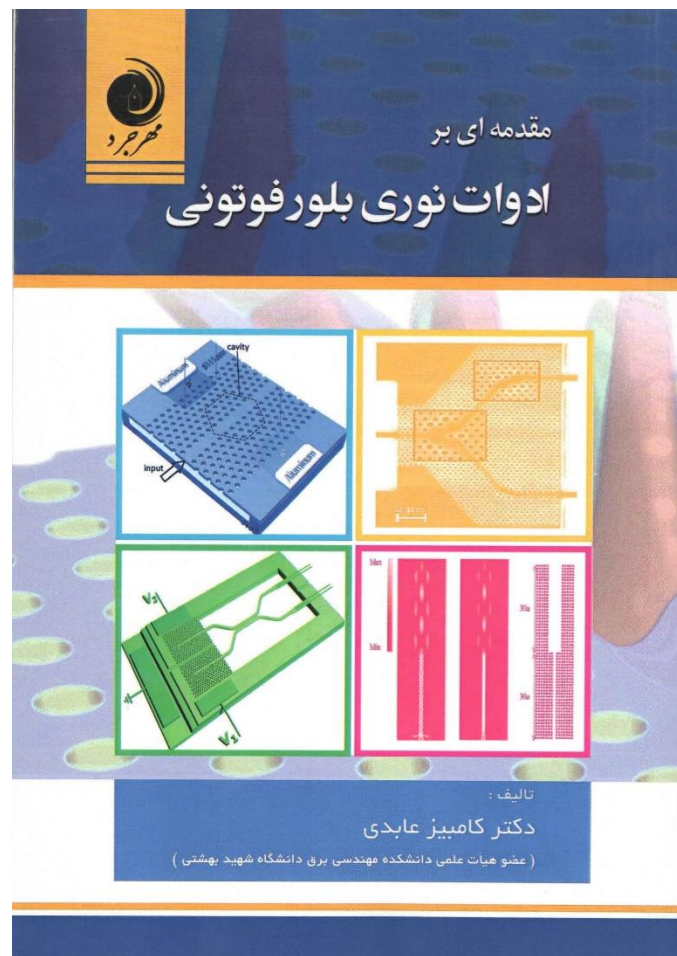
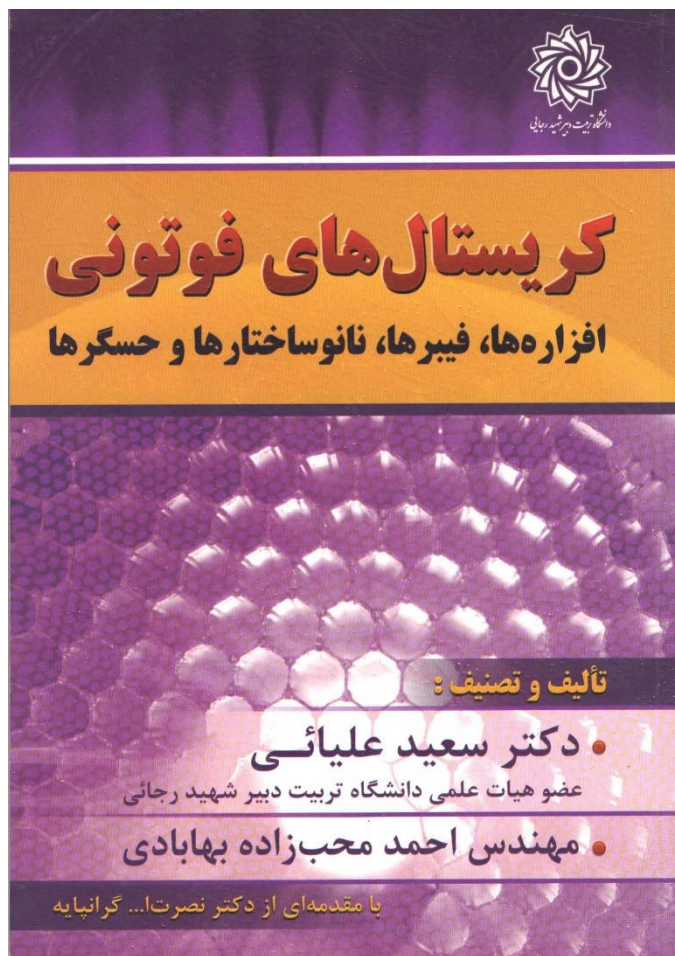
2. Photonic Crystals - Lourtioz (2005)
3. Photonic Crystals - Advances - Busch (2004)
4. Photonic Crystals- Johnopoulos (2008)
5. Roadmap on PhCs-Noda-Baba (2003)
6. Lecture Notes - Dr. khorasan- (Farsi)
9. Optical Properties of Photonic Crystals- Sakoda (2005)
12. Nanophotonics (Herve Rigneault etc., 2006)



# ترجمه مرجع ۴ و ۹

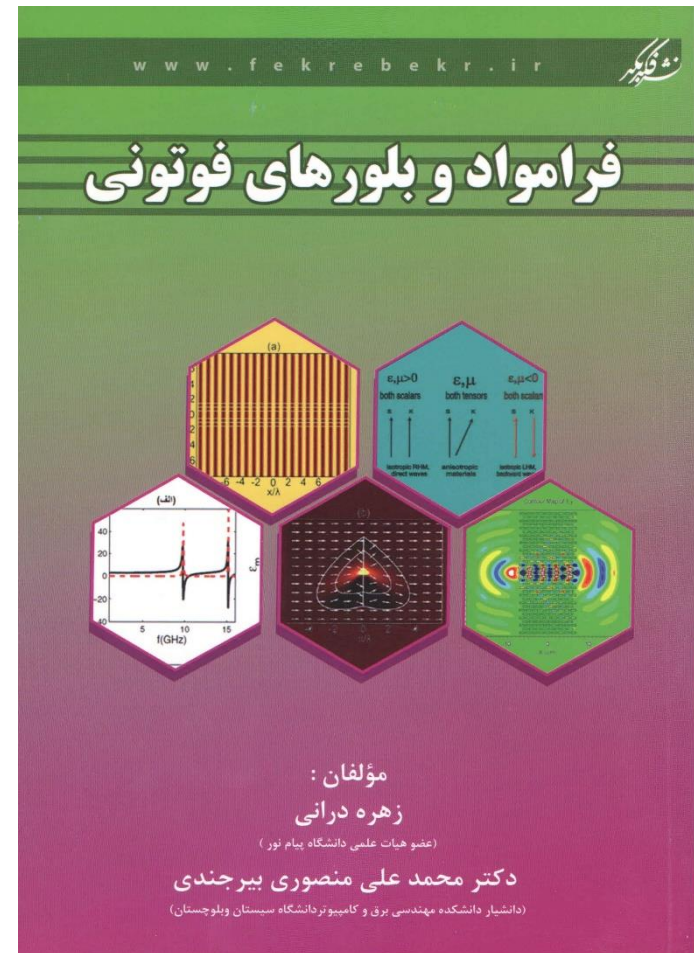
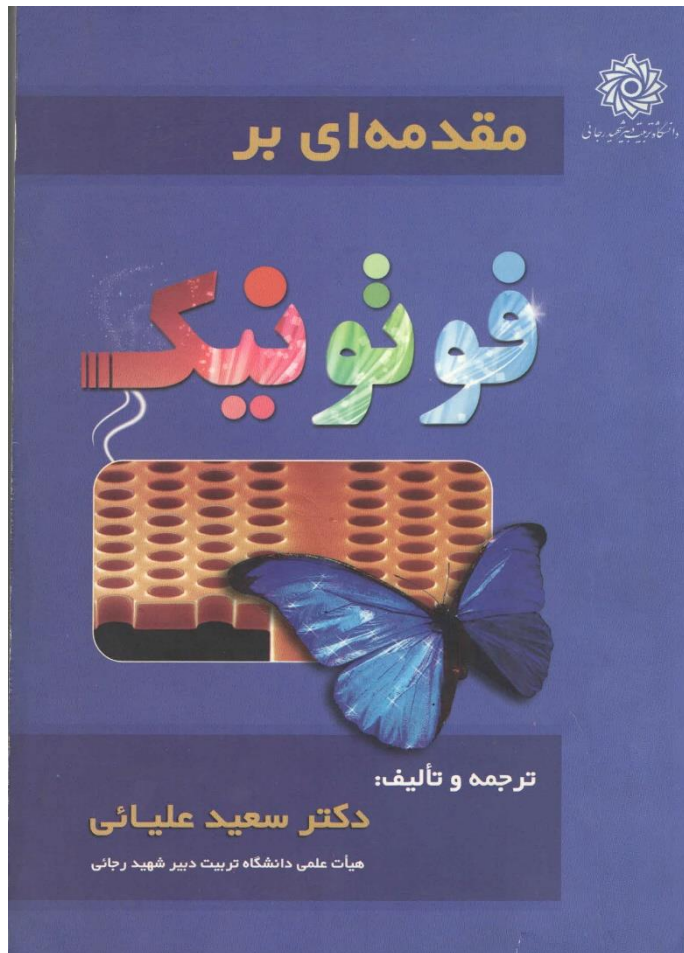


# کتابهای تالیفی به زبان فارسی (۱)





# کتابهای ترجمه و تالیف به زبان فارسی (۲)



# Contents (1)

---

## **1 Introduction**

**K. Inoue**

1.1 History of Research on Photonic Crystals

1.2 Types of Photonic Crystals

1.3 Light States in a Photonic Crystal

1.3.1 Description of Light State in Vacuum

1.3.2 Light State and Its Density for a Photonic Crystal

References

# 2 Survey of Fundamental Features of Photonic Crystals

K. Inoue, K. Ohtaka

## 2.1 One-Dimensional Photonic Crystal: Band Calculation

2.1.1 Bloch Theorem

2.1.2 Scaling Property of Photonic Band Structure

## 2.2 One-Dimensional Photonic Crystal:

### Various Concepts and Characteristic Features of Photonic Bands

2.2.1 First Band at  $k \approx 0$

2.2.2 Photonic Bands for  $k$  near the BZ Boundary

2.2.3 Tendency of Photon Localization: Dielectric and Air Bands

2.2.4 Slow Group Velocity

## 2.3 Concept of the Light Cone and Example of One-Dimensional Off-Axis Band

## 2.4 Band Structures of Two- and Three-Dimensional Photonic Crystals

2.4.1 Examples of Two-Dimensional Photonic Band

2.4.2 Example of Three-Dimensional Photonic Band

## **2 Survey of Fundamental Features of Photonic Crystals**

**K. Inoue, K. Ohtaka**

---

### **2.5 How to Experimentally Explore the Band Structure**

### **2.6 Defect Modes**

### **2.7 Common and Fundamental Features of Photonic Band Structure**

- 2.7.1 Existence of Photonic Band Gap
- 2.7.2 Existence of Defect or Local Modes
- 2.7.3 Anomalous Group Velocity
- 2.7.4 Remarkable Polarization Dependence
- 2.7.5 Manifestation of Peculiar Bands

### **2.8 Application of Photonic Crystals**

References

# 3 Theory I: Basic Aspects of Photonic Bands

K. Ohtaka

## 3.1 2D or 3D Photonic Band Structure

3.1.1 full Maxwell's Equations

3.1.2 Plane-Wave Expansion Method

## 3.2 Parity of Mirror Reflection of 2D PBS

## 3.3 Light Transmission and Reflection

3.3.1 Transmission through a 1D Photonic Crystal

3.3.2 Transmission through a 2D or 3D Photonic Crystal

3.3.3 Diffraction

3.3.4 Transmittance and Reflectance versus PBS

## 3.4 Photonic Crystals of Finite Thickness

3.4.1 Light Cone Dividing Leaky and Nonleaky regions

3.4.2 Formation of Photonic Band Structure in a Slab

3.4.3 Thick Slab of Photonic Crystal

## 3.5 Whispering Gallery Modes and Mie Resonances

## 3.6 Concept of Heavy Photons and Tight-Binding Bands

References

# 4 Theory II: Advanced Topics of Photonic Crystals

K. Ohtaka

## 4.1 Methods not Based on Plane-Wave Expansion

4.1.1 4.1.2

## 4.2 Group Theory of Photonic Crystals

4.2.1 4.2.2 4.2.3 4.2.4

## 4.3 Leaky Modes of Slab-Type Photonic Crystals

4.3.1 4.3.2 4.3.3 4.3.4

## 4.4 Layer-Doubling Method

4.4.1 4.4.2

## 4.5 Origin of Band Gap Modes

4.5.1 4.5.2 4.5.3

## 4.6 Inhomogeneous Maxwell Equations

4.6.1 4.6.2

## 4.7 Optics of Photonic Crystals

References

# 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

11.3.2

### 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

11.5.2

### 11.6 Polarization Filters

### 11.7 Dispersion Compensators

### 11.8 Light Control Devices

### 11.9 Harmonic Generation

### References

# فهرست مطالب

## فصل اول: مقدمه

۱-۱- تاریخچه تحقیقات بر روی بلورهای فوتونی

۱-۲- انواع بلورهای فوتونی

۱-۳- حالت های نور در یک بلور فوتونی

۱-۳-۱- بررسی حالت نور در خلاء

۱-۳-۲- حالت و چگالی نور برای یک بلور فوتونی



# فصل ۲

## خلاصه ای از ویژگی های اساسی بلورهای فوتونی

۱-۲- بلور فوتونی یک بعدی (محاسبات نوار)

۲-۱-۱- قضیه بلاخ

۲-۱-۲- خاصیت مقیاس پذیری ساختار نوار فوتونی

۲-۲- بلورهای فوتونی یک بعدی (مفاهیم گوناگون و ویژگی مشخصه نوارهای فوتونی)

۲-۲-۱- اولین نوار در  $K \approx 0$

۲-۲-۲- نوارهای فوتونی نزدیک مرز ناحیه بریلوین (BZ) برای  $k$

۲-۲-۳- روند مقید کردن فوتون: دی الکتریک و نوارهای هوا

۲-۲-۴- سرعت گروه کند

۲-۲-۵- چگالی حالات

۲-۳- مفهوم مخروط نور و مثالهایی از نوار off-Axis یک بعدی

## ادامه فصل ۲

# خلاصه ای از ویژگی های اساسی بلورهای فوتونی

- ۲-۴- ساختار نوار بلورهای فوتونی دوبعدی و سه بعدی
  - ۲-۴-۱- مثال هایی از نوار فوتونی دوبعدی
  - ۲-۴-۲- مثال هایی از نوار فوتونی سه بعدی
- ۲-۵- چگونگی کشف ساختار نوار به طور تجربی
- ۲-۶- مدهای نقص
  - ۲-۷- ویژگی های اساسی و مشترک ساختار نوار فوتونی
    - ۲-۷-۱- وجود شکاف نوار فوتونی
    - ۲-۷-۲- وجود مدهای نقص یا محلی
    - ۲-۷-۳- سرعت غیر عادی گروه
    - ۲-۷-۴- وابستگی های قابل توجه قطبش
    - ۲-۷-۵- ظهور نوارهای ویژه
- ۲-۸- کاربرد بلورهای فوتونی

# مقدمه

❖ تاریخچه تحقیقات بر روی بلورهای فوتونی (**Photonic Crystal**)

❖ ارائه بعضی ساختارهای بلورهای فوتونی نمونه

❖ معرفی اساسی مفهوم حالت ویژه برای نور و باند فوتونی (**Photonic Band**)

❖ وجود باند فوتونی حساس و منحصر به فرد در بلورهای فوتونی دلیل جذابیت

بلورهای فوتونی در کنترل میدان تابشی و ویژگی های انتشار نور است.

جان مادوکس (1990): اگر امکان میداشت که مواد دی الکتریکی ساخته شوند که در آن امواج الکترومغناطیسی نمی توانستند در بسامدهای معینی انتشار یابند، هر نوع چیز تقریباً سحرآمیزی امکان پذیر می شد.

# ۱-۱- تاریخچه تحقیقات بر روی بلورهای فوتونی

## ❖ زمان شروع تحقیقات روی بلورهای فوتونی؟

❖ بیش از ۷۰ سال پیش، یک صفحه ربع طول موج یا آینه های دی الکتریک چندلایه (مثل آنهایی که در کاواک لیزر برای داشتن Q بالا استفاده می شوند)، به طور وسیعی در اپتیک کاربرد داشته اند.

❖ آنها مثال هایی از بلورهای فوتونی تک بعدی بودند.

❖ بلورهای فوتونی تک بعدی فقط برای اهداف محدودی مفیدند.

❖ با استفاده از بلورهای فوتونی دو بعدی و سه بعدی می توان نور را به صورت خیلی آزادانه تر کنترل کرد.

❖ سال ۱۹۸۷: برای اولین بار، بلورهای فوتونی به صورت تئوری در دو مقاله مستقل توسط یابلونوویچ (E. Yablonovitch) و جان (S. John) بررسی و اثبات شد.

❖ سال ۱۹۷۹: اوهاکا (K. Ohtaka) (یکی از مولفان این کتاب) نتایج محاسبات روی ساختار باند یک بلور فوتونی سه بعدی را ارائه داده بود.

# ۱-۱- تاریخچه تحقیقات بر روی بلورهای فوتونی (۲)

❖ بر طبق مقاله اول، **اوهتاکا** و همکارانش یک سری مقالات مربوطه را از سال ۱۹۸۰ تا ۱۹۸۳ منتشر کردند.

❖ در بعضی از این مقالات با یک سری محاسبات دریافتند که **چگالی حالات** یا **مدهای فوتونی** در یک بلورهای فوتونی می تواند در مقایسه با حالت همگن، کاملاً بزرگ باشد و اهمیت آنها را در بعضی پدیده های فیزیکی مثل **پراکندگی سطح پیشرفته رامان**، بررسی کردند.

❖ از طرف دیگر، آنها به بررسی در مورد حالت **ناپدیدشدگی چگالی حالات**، برای مثال وجود یک باند فوتونی کامل، نپرداختند.

❖ به هر حال آنها براین موضوع، که با استفاده از یک بلور فوتونی می توان نور را به راحتی به اندازه ی قابل توجهی **کنترل** کرد، **پافشاری نکردند**.

❖ احتمالاً به این دلیل بود، که متأسفانه این مقالات **تاثیر چشمگیری** بر روی فیزیکدانان در آن زمان **نداشت**.

# ۱-۱- تاریخچه تحقیقات بر روی بلورهای فوتونی (۳)

❖ برای مثال تعداد محققین تجربی که علاقه مند به بلور فوتونی سه بعدی با آرایش اجزاء **پلی استیرنی** بودند کم بود. اما، حتی آنها هم، از اهمیت آنها آگاهی نداشتند.

❖ برای مثال آنها هیچ توجهی به **ساختار باند منحصر به فرد** آن نکردند. اما فقط برای اهداف تحقیقاتی مختلف از آن نمونه ها استفاده کردند.

❖ در مقابل، **یابلونوویچ** با شبیه سازی، وجود یک **گاف نوار فوتونی** را نشان داد که در آن همه ی مدها در همه ی جهات ناپدید شده بودند و در نتیجه، از تابش خود به خودی موج متناظر با انرژی گاف، در داخل یک **بلور فوتونی سه بعدی** جلوگیری شده است.

❖ از طرف دیگر **جان** نشان داد که یک **پدیده جدید** را با استفاده از یک بلور فوتونی میتوان مشاهده کرد که شامل **متمرکز کردن نور** است.

❖ به این دلیل این مقالات، **شوک بزرگی** را بر گروهی از دانشمندان، از جمله فیزیکدانان و مهندسی که در زمینه فیزیک کاربردی یا **الکترونیک نوری** کار می کردند، وارد کرد.

# ۱-۱- تاریخچه تحقیقات بر روی بلورهای فوتونی (۴)

- ❖ از سال ۱۹۸۷ بسیاری از دانشمندان تحقیقات خود را با کار در این زمینه، شروع کردند. اگر چه بیشتر کارها در چهار یا پنج سال اول، و جدای از آزمایشهای مختلف، اساسا مطالعات، تئوری بود.
- ❖ بیشتر اهمیت روی این بود که چه نوع ساختاری مناسبتر است.
- ❖ همچنین چه اندازه اختلاف بین ضرایب شکست وابسته ( $n$ )، برای ایجاد یک گاف باند فوتونی کامل در بلورهای فوتونی سه بعدی، یا دو بعدی نیاز است.
- ❖ در حالت دوبعدی، منظور از یک گاف نوار کامل آن است که در همه جهت ها در صفحه دو بعدی است.
- ❖ آرایش های متنوعی از ساختارهای باند فوتونی با استفاده از نمونه هایی که با ثابت شبکه  $a$  در ابعاد میلیمتر یا زیر میلیمتر ساخته شده اند، بصورت تجربی امتحان شده است.
- ❖ سال ۱۹۹۱: یابلونوویچ و همکارانش تحقیقات تجربی گاف نوار فوتونی کامل، را بر روی وجود نمونه سه بعدی با ثابت  $a$  و در ابعاد میکرومتری آغاز کردند.

# ۱-۱- تاریخچه تحقیقات بر روی بلورهای فوتونی (۵)

❖ طبق **قانون مقیاس پذیری** و یا در رابطه با نسبت  $a/\lambda$ ، چنین استنباط میشود که یک بلور فوتونی **سه بعدی با گاف کامل** در ناحیه نوری برای ساختار و ثابت های دی الکتریک مشابه با ابعاد میکرومتری، بدست میآید، اما با مقدار  $a$  ای که به اندازه طول موج های نوری کاهش یافته است.

❖ یعنی **انرژی مد ویژه فوتون** میتواند در واحدهای  $a/\lambda$  تنظیم شود که تعیین کننده این است که اگر شرایط لازم مذکور ارضا شده باشد، یک ساختار باند مشابه نیز باید به طور تجربی در ناحیه نوری بدست آید.

❖ در نزدیک ناحیه مادون قرمز یا نوری، ساخت انواع جدید نمونه های بلور فوتونی **سه بعدی و دو بعدی** به طور مستقل از نمونه های کروی پلی استیرن معلق، در نیمه اول دهه **۱۹۹۰** به این روش یا روشهای دیگر به طور موفقیت آمیزی آغاز شد که شامل نمونه هایی با گاف باند فوتونی دوبعدی بود.

❖ درمقابل یکی از اهداف اصلی، نمونه های **سه بعدی** با **گاف نوار کامل** بود که ساخت آنها به صورت تکنیکی تا حدود سال **۱۹۹۹** هنوز مشکل بود.



# ۱-۱- تاریخچه تحقیقات بر روی بلورهای فوتونی (۶)

□ در این زمان نودا (Noda) و همکارانش برای اولین بار موفق به ساخت چنین نمونه ای با استفاده از یک تکنیک خاص شدند. (نمونه **سه بعدی** با **گاف نوار کامل**).

□ در سال **۱۹۹۵** یک پیشگام به نام **یابلونوویت** (Yablanovite) سعی کرد که چنین نمونه سه بعدی را بسازد، اما متاسفانه **کیفیت نمونه** برای شناخت باند به صورت عملی، به اندازه کافی **خوب نبود**.

□ تاثیر اولین کارهایی که توسط **یابلونوویچ** و **جان** انجام شد آنقدر قوی بود که تا اوایل دهه ی **۱۹۹۰**، گرایشاتی در نظریات ما برای محققین به وجود آورد که **فکر می شد** نمونه هایی با **گاف کامل** برای کنترل نور در بیشتر حالات **ضروری** است.

□ اگر چه محققین به تدریج آگاهی یافتند که پدیده های جالب زیادی وجود دارند که با استفاده از یک نمونه **بدون یک گاف باند فوتونی دوبعدی یا سه بعدی** نشان داده می شوند.

□ بنابراین، تعداد گروه های تحقیقاتی یا دانشمندان به میزان زیادی در نیمه دوم دهه **۱۹۹۰** رشد یافت.

# ۱-۱- تاریخچه تحقیقات بر روی بلورهای فوتونی (۷)

- در هفت سال اخیر انواع نمونه های بلور فوتونی، شامل نمونه های **سه بعدی** با یک **گاف کامل** در نزدیکی **نواحی نوری و مادون قرمز** ساخته شده است.
- این نمونه ها به صورت خاص و با کیفیت خوب، شخص را به انجام انواع آزمایشهای جدیدی در رابطه با **ویژگیهای برجسته** و **منحصر به فرد ساختار باند فوتونی**، قادر میسازند.
- با استفاده از این ویژگیها، تعدادی از **پدیده فیزیکی جدید و ادوات نو**، بطور خاص در **الکترونیک نوری**، بصورت تئوری پیشنهاد شده است.
- از یک طرف، اخیرا انواع آن **پدیده ها مشاهده** شده است و از طرف دیگر **ادوات** و دستگاه های جالبی ایجاد شده اند که بعضی از آنها قبلا از نظر **تجاری** موجود بودند.
- در باب نمونه های بلور فوتونی ذکر شده در بالا، در بخش بعدی به صورت خلاصه **انواع بلورهای فوتونی** را بیان خواهیم کرد.
- **ویژگیهای اساسی** و عمومی ساختار باند فوتونی و کاربرد آنها، یا **ادوات پایه** بلور فوتونی، در قسمت بعدی آمده است.

# ۱-۲- انواع بلورهای فوتونی (۱)

□ بلور فوتونی: بلوری که ثابت دی الکتریک آن، ( $\epsilon$ ) به طور متناوب و به صورت فضایی در جهت های مشخص تغییر می کند.

□ وقتی تغییرات  $\epsilon$  در یک جهت باشد، آن را بلور فوتونی یک بعدی می نامیم.

□ وقتی تغییرات  $\epsilon$  در دو یا سه جهت باشد، به ترتیب بلورهای فوتونی دوبعدی و سه بعدی را تعریف میکنیم.

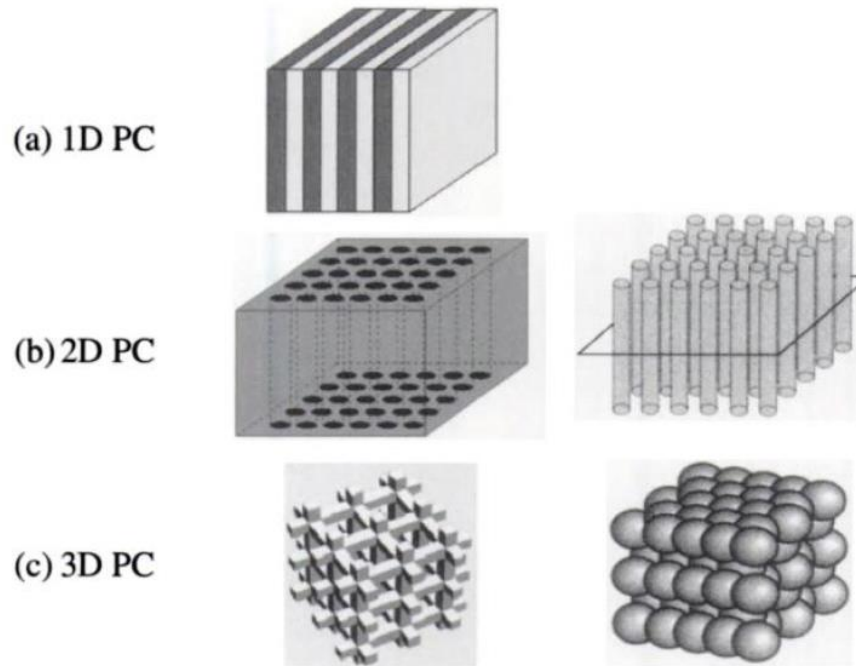
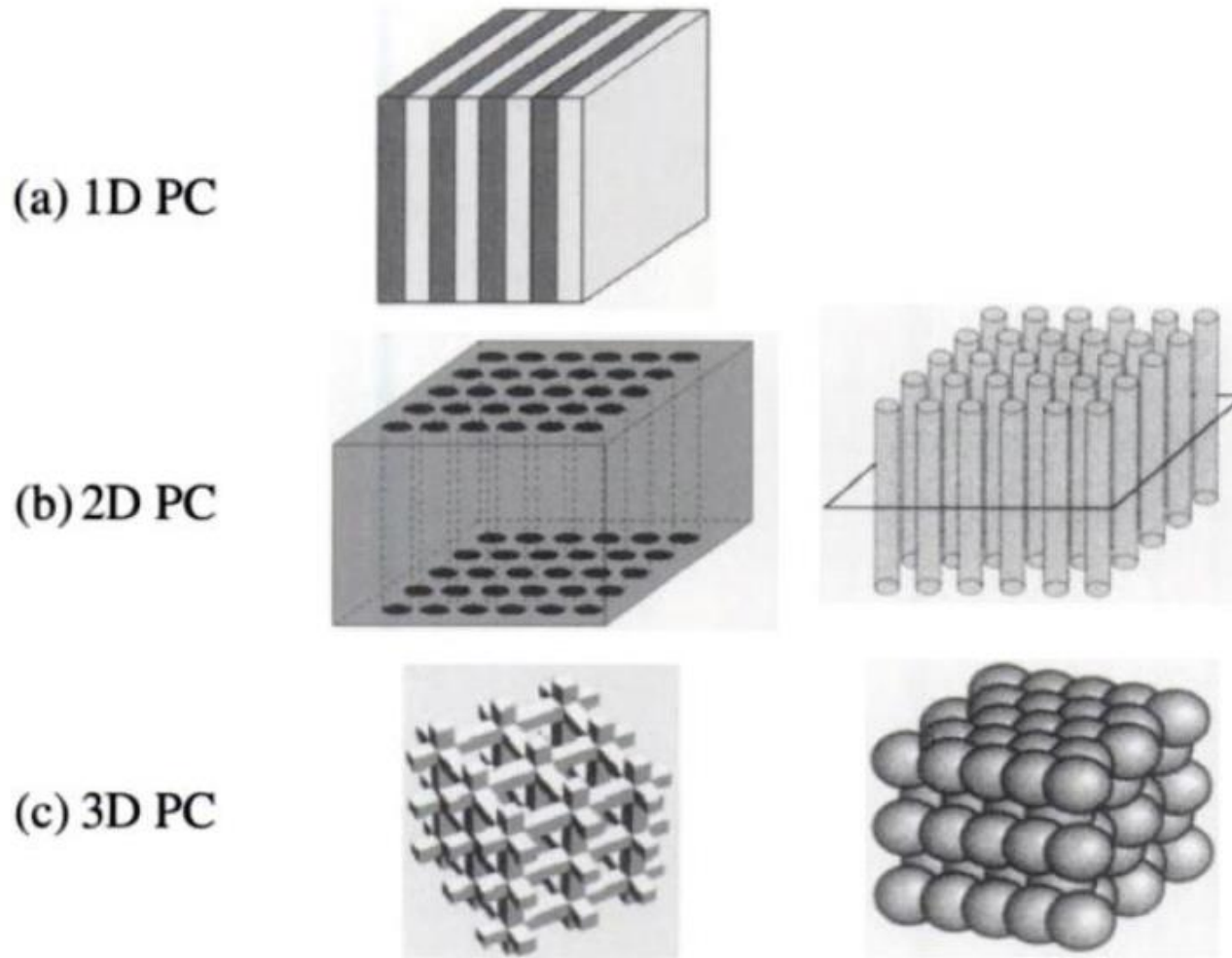


Fig. 1.1. Schematics of representative 1D, 2D and 3D photonic crystals

# ۱-۲- انواع بلورهای فوتونی (۲)



**Fig. 1.1.** Schematics of representative 1D, 2D and 3D photonic crystals

## ۱-۲- انواع بلورهای فوتونی (۳)

- ❖ یک مثال مشهور از بلور فوتونی **یک بعدی**: لایه دی الکتریک چند لایه است.
- ❖ درمورد بلور فوتونی **دو بعدی**: فصل مشترک هوا - یا میله دی الکتریک با یک صفحه عمودی، یک شبکه دو بعدی را تشکیل می دهد. پس این صفحه، یک صفحه بلور فوتونی دو بعدی است.
- ❖ حالت های نور در داخل بلور فوتونی یک بعدی، معادل با **مدهای ویژه نور** با بردار موج **k**، موازی با این جهت خاص، کاملاً **متفاوت** با آنهایی است که دارای **دی الکتریک یکنواخت** میباشند.
- ❖ به طور مشابه، **مد ویژه نور** مربوطه با **k** در صفحه دو بعدی، در مورد بلور فوتونی دو بعدی و با **k** در یک جهت دلخواه در حالت **سه بعدی** منحصر به فرد می شود، چنانچه دوباره با **دی الکتریک های دو بعدی و سه بعدی همگن** مقایسه شود.

## ۱-۲- انواع بلورهای فوتونی (۴)

❖ اگر ضخامت صفحات به اندازه یا کوچکتر از طول موج نور مربوطه باشد، وضعیتی که برای صفحه بلور فوتونی یک بعدی و دوبعدی وجود دارد، کاملاً متفاوت از بلورهای فوتونی یک بعدی (دوبعدی) است که ضخامت آن به طور مقایسه، بینهایت بزرگ فرض شده باشد.



(a) one-dimensional slab



(b) two-dimensional slab

**Fig. 1.2.** Schematics of photonic crystal slabs

## ۱-۲- انواع بلورهای فوتونی (۵)

❖ نور می تواند در قسمت مرکزی در طول فیبر بلور فوتونی منتشر شود.



**Fig. 1.3.** A schematic drawing of an example of a photonic crystal fiber

# ۱-۲- انواع بلورهای فوتونی (۵)

❖ تاکنون بلورهای فوتونی را متناظرا با **بعدشان** دسته بندی کردیم.

❖ **دسته بندی دیگر** انواع بلورهای فوتونی:

1. بلور فوتونی ساخته شده از مواد فلزی
2. بلور فوتونی با یک ساختار شبه کریستالی
3. بلور فوتونی با دو دوره تناوب



# ۱-۳- حالت های نور در یک بلور فوتونی

## ۱-۳-۱- بررسی حالت نور در خلاء

- ❖ یک حالت ساده از یک محیط شفاف و یکنواخت را در نظر میگیریم.
- ❖ **حالت ویژه نور** (eigenstate) یا **مد** (mode) با تعدادی اندیس مشخص میشود:

$$(\hbar\omega, k, e)$$

$\hbar\omega$ : انرژی فوتون       $k$ : بردار موج       $e$ : حالت قطبش

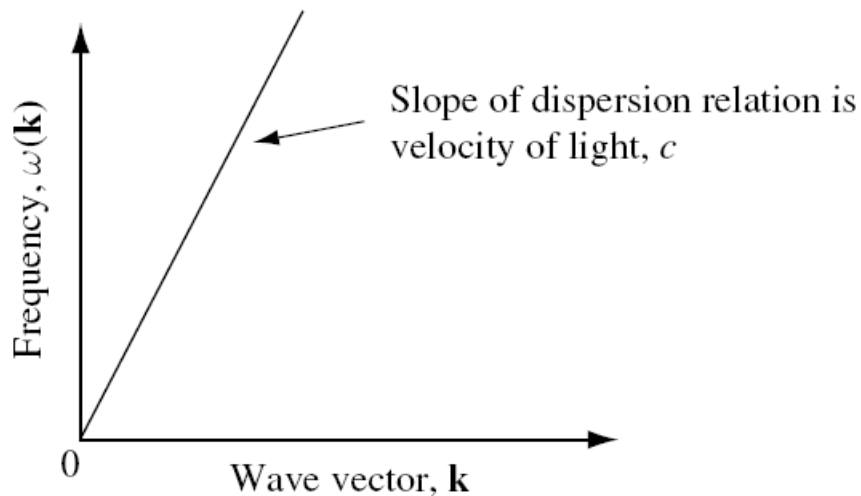
- ❖ برای هر **حالت ویژه**، یک مشخصه **الگوی فضایی** میدان های الکتریکی (E) و مغناطیسی (H) استفاده میشود که **مد** نامیده میشود.
- ❖ برای هر نوع **قطبش**، یک رابطه بین  $\hbar\omega$  و  $k$  وجود دارد؛
- ❖ ویژگیهای یک محیط پاشنده (**dispersive**)، در رابطه پاشندگی (dispersion)، منعکس میشود.

# ۱-۳-۱- بررسی حالت نور در خلاء (۲)

❖ در یک نمونه با فضای خلاء بینهایت بزرگ، رابطه پاشندگی به صورت زیر بیان میشود که  $c$  سرعت نور در خلاء است.

$$\omega = ck \quad , \quad (k = |k|)$$

❖  $\omega$  و حالت ویژه از یک موج تخت عرضی  $k$  هست که با یک دامنه و جهت دلخواه وجود دارد.



# ۱-۳-۱- بررسی حالت نور در خلاء (۳)

- ❖ برای نشان دادن **مدهای** مشخصه یک امواج الکترومغناطیسی در یک **فضای بسته تهی**، بسته مکعبی به ضلع **L** و در جهات **x, y, z** را در نظر میگیریم.
- ❖ با پذیرش شرایط تناوبی روی سطح مکعب با ضلع **L**، داریم:

$$k_i = (2\pi / l)n_i \quad i = x, y, z$$

$$n_i = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

□ بنابراین، مدهایی با مقادیر گسسته از  $(2\pi/L)(n_x, n_y, n_z)$  برای  $(k_x, k_y, k_z)$  به دست میآید که در آنها **k** به صورت زیر بیان می شود:

$$k^2 = (2\pi / l)^2 (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2) \quad (1-1)$$

# ۱-۳-۱- بررسی حالت نور در خلاء (۳)

❖ به غیر از ضریب ۲ برای در نظر گرفتن قطبش، تعداد نقاط در کره ای با شعاع  $R$ ، متناظر با تعداد مدها با محدوده فرکانسی از صفر تا  $\omega$  است.

$$\omega = (2\pi c / l)R$$

❖ توجه داشته باشید که  $L$  خیلی بزرگتر از طول موج نور  $\lambda = (2\pi/k)$  است.

پس  $(n_x^2 + n_y^2 + n_z^2)$  یک کمیت خیلی بزرگ است. ←

$$\Rightarrow V = \frac{4}{3}\pi R^3, \quad R = \left(\frac{\omega L}{2\pi c}\right) \Rightarrow 2(4\pi/3)(l/2\pi c)^3 \omega^3$$

❖ بنابراین، چگالی حالت‌های الکترومغناطیسی، یا چگالی حالات فوتون، (DOS)، یا تعداد مدها در یک حجم واحد با فرکانسهای بین  $\omega$  و  $d\omega$ :

$$\rho(\omega)d\omega = [\omega^2 / (\pi^2 c^3)]d\omega \quad (1-2)$$

توجه: بزرگی هر کمیت فیزیکی، توسط چگالی مد آن بیان می شود.

# ۱-۳-۲ حالت و چگالی حالت نور برای یک بلور فوتونی

- ❖ حالت‌های ویژه نور در یک بلور فوتونی، یعنی حالتی که  $\epsilon(\mathbf{r})$  به طور تناوبی نسبت به  $\mathbf{r}$  تغییر میکند، و  $\mathbf{r}$  بردار مکان آن است، با نوع محیط همگن خیلی متفاوت است.
- ❖ برای سادگی، حالت غیرمغناطیسی را در نظر بگیرید که دی الکتریک (عایق) دارای ضریب نفوذپذیری مغناطیسی خلاء باشد.
- ❖ معادله ی موج برای  $H(\mathbf{r})$  را می توان با ترکیب معادلات الکترومغناطیس ماکسول بدست آورد:

$$\nabla \times [\epsilon(\mathbf{r})^{-1} \nabla \times H(\mathbf{r})] = \mu_0 \omega^2 H(\mathbf{r}), \quad (1-3)$$

$$H(\mathbf{r}, t) = H(\mathbf{r}) \exp(i\omega t), \quad E(\mathbf{r}, t) = E(\mathbf{r}) \exp(i\omega t) \quad (1-4)$$

- ❖ یعنی، این مسئله به حل یک مسئله مقدار ویژه کاهش مییابد.
- ❖ یکبار که با حل معادله،  $H(\mathbf{r})$  را با مقدار ویژه  $\mu_0 \omega^2$  بدست آوردیم، سپس با استفاده از رابطه زیر،  $E(\mathbf{r})$  از  $H(\mathbf{r})$  بدست میآید:

$$E(\mathbf{r}) = (i\omega)^{-1} [\epsilon(\mathbf{r})^{-1} (\nabla \times H(\mathbf{r}))] \quad (1-5)$$

# ۱-۳-۲ حالت و چگالی حالت نور برای یک بلور فوتونی (۲)

❖ **منحنی پاشندگی** برحسب  $k$  به باندهایی تقسیم میشود که باندهای فوتونی (PB) نامیده میشوند.

❖ ساختار کامل باندها، **ساختار نوار فوتونی (PBS)** نامیده می شوند.

❖ مهمترین مطلب این است که **چگالی حالت فوتون**، برای یک بلور فوتونی به طور خیلی گسترده ای با **فرکانس** و همچنین **قطبش**، تغییر میکند.

❖ به ویژه، چگالی حالات، بالاتر از یک ناحیه انرژی، برای یک بلور فوتونی مخصوص از بین میرود.

❖ از لحاظ فیزیکی، ساختار باند فوتونی منحصر به فردی، شامل شکاف باند فوتونی (PBG) وجود دارد که منشایی برای کنترل نور است.

