

COMSOL Multiphysics 2010年全球用户年会中国区北京分会-2010-10-28

Some Applications on the Fields of Laser, PCF and PCF-Sensor by Comsol Software

姚建铨¹, 安琳²

1.天津大学激光与光电子研究所, Email: jqyao@tju.edu.cn

2.中仿科技

COMSOL Multiphysics

全球第一款真正的多物理场耦合 分析软件

- 基于偏微分方程组(PDEs)而开发。
- 将任意耦合的多物理场PDEs转化为适当的形式，利用矢量有限元方法数值求解。
- 易用性：内建多个“应用模式”，简单鼠标操作，即可自动建立相应的PDE，从而建立包含任意数量物理场的耦合模型。



光频电磁场（RF模块）

COMSOL在光频电磁场分析方面的应用:

1. **Lasers**
2. 光学非线性介质、色散介质的仿真
3. 纳米光子学
4. 负折射率材料
5. 光子晶体
6. 光子晶体光纤（**Laser + terahertz**）
7. 光子晶体光纤传感器
8. **Metamaterials**
9. **Graphane**
10. **PPLN -----**

光频电磁场（RF模块）

COMSOL在光频电磁场分析方面的优势

1. 能够处理任意类型的辐射源

COMSOL没有器件库，研究人员直接指定入射边界上的电场分布

可以是常数（如连续波）、解析表达式（如高斯聚焦光束）、数组（实验测量结果）

2. 能够处理任意复杂材料属性

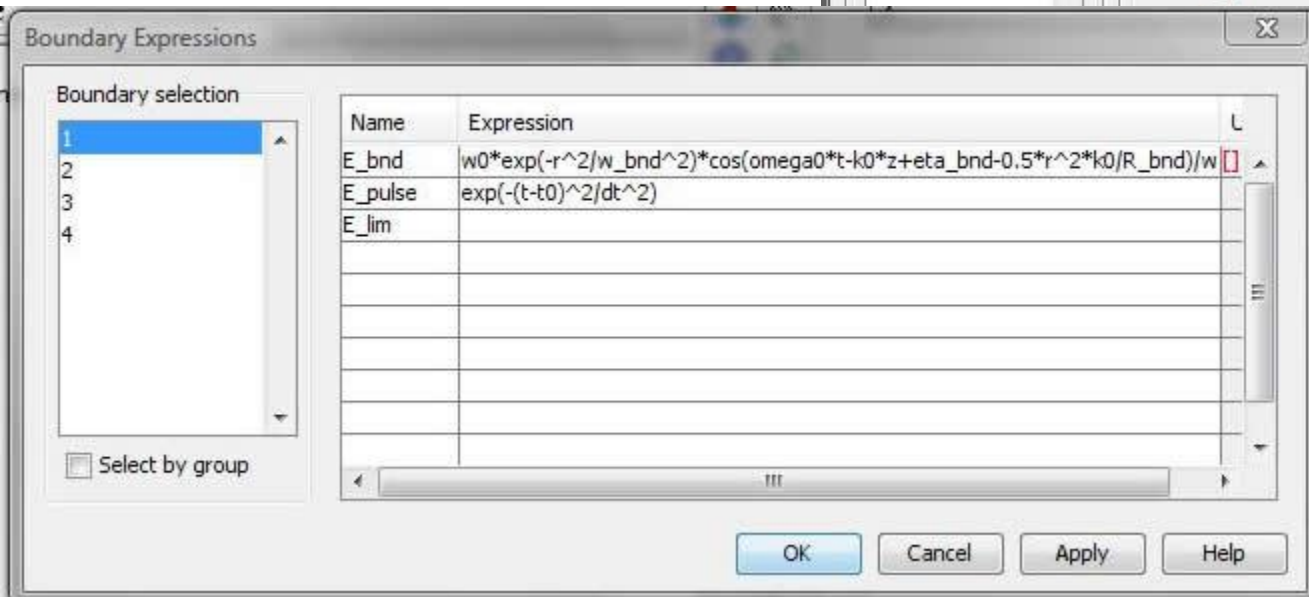
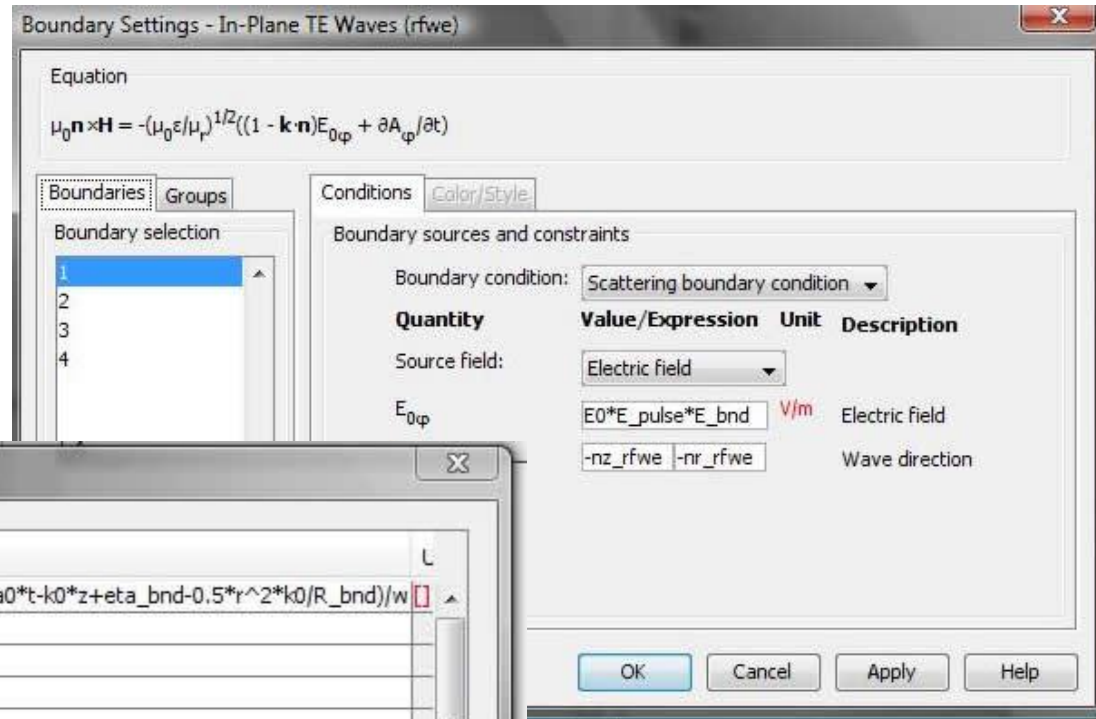
色散、非线性、各向异性、负折射率

3. 灵活的后处理，与Matlab协同工作

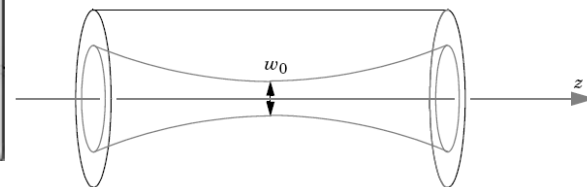
灵活地定义入射光场

COMSOL中任何填入数据的地方都支持：

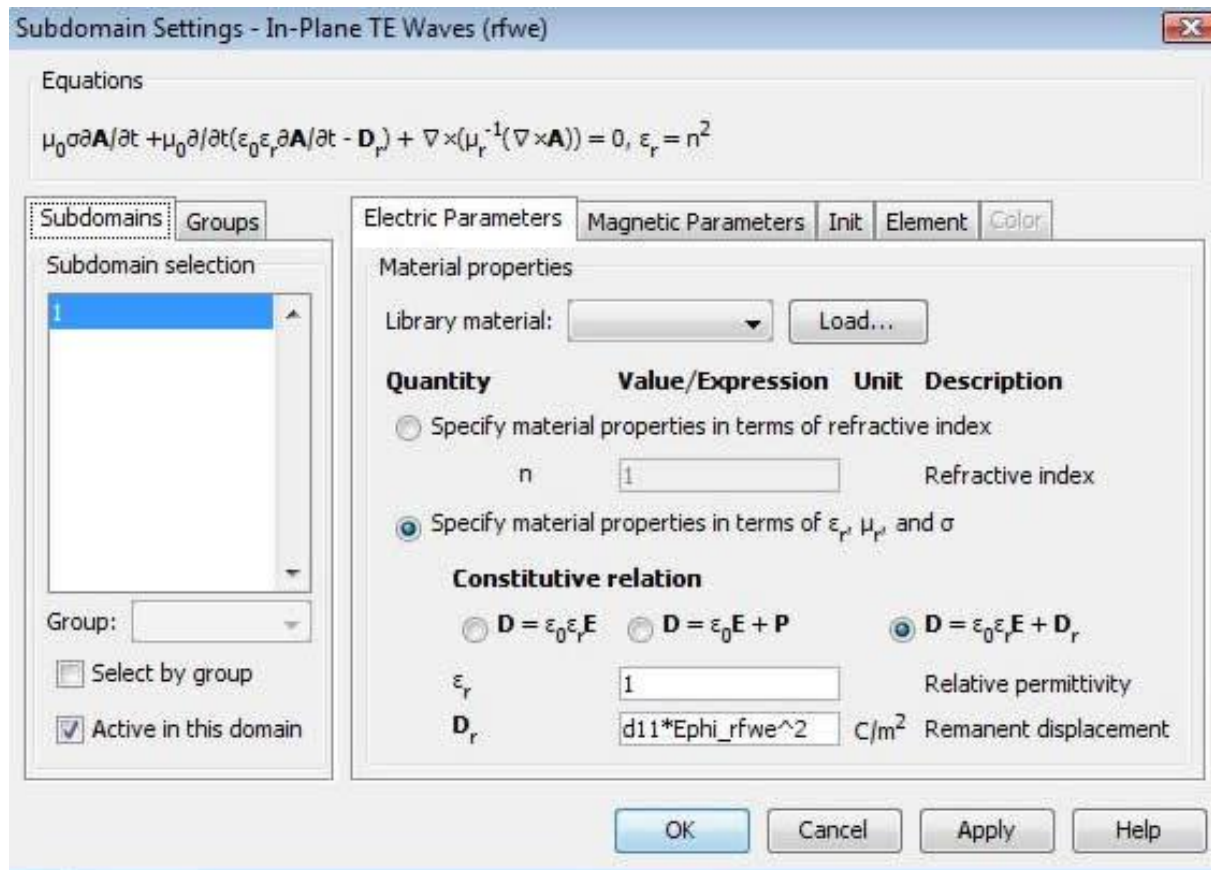
常数、向量/标量表达式、
数组（由文本数据插值而来）、
分段函数、逻辑表达式。



定义一个高斯聚焦光束



直接定义材料的非线性



如果材料是时变的或者不均匀的，可以直接定义成坐标或时间的函数。

材料特性可以是另一个自定义PDE的解

Treats electrons as damped, anharmonic oscillators:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} + 2\delta \frac{\partial P}{\partial t} + \omega_0^2 (1 + \alpha P^2(t)) P(t) = \varepsilon_0 \chi_1 \omega_p^2 E(t)$$

Dispersion Damping Resonance Nonlinearity Susceptibility
(refractive index)

V. Janyani, A. Vukovic, J. D. Paul, P. Sewell, T. M. Benson, "The Development of TLM Models for Nonlinear Optics," *Microwave Review* **10** (2004) pp. 35-42.

$\alpha = 0$, Lorentz dispersion

$\omega_0 = 0$, $\chi_1 = 1$, Drude dispersion

Subdomain Settings - In-Plane TE Waves (rfwe)

Equations

$$\mu_0 \sigma \partial \mathbf{A} / \partial t + \mu_0 \partial / \partial t (\epsilon_0 \partial \mathbf{A} / \partial t - \mathbf{P}) + \nabla \times (\mu_r^{-1} (\nabla \times \mathbf{A})) = 0, \epsilon_r = n^2$$

Subdomains Groups

Subdomain selection

1

Electric Parameters Magnetic Parameters Init Element Color

Material properties

Library material:

Quantity Value/Expression

Specify material properties in terms of

Specify material properties in terms of

Constitutive relation

$\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E}$ $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$

ϵ_r 1

\mathbf{P} p

\mathbf{D}_r $\epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E} + \mathbf{P}$

Group:

Select by group

Active in this domain

OK

Expressions for the coefficients of the Duffing equation

Subdomain Settings - PDE, Coefficient Form (Duffing)

Equation

$$e_3 \partial^2 p / \partial t^2 + d_3 \partial p / \partial t + \nabla \cdot (-c \nabla p - \alpha p + \gamma) + \alpha p + \beta \cdot \nabla p = f$$

Subdomains Groups

Subdomain selection

1

Group:

Select by group

Active in this domain

Coefficients Init Element Weak Color

PDE coefficients

Coefficient	Value/Expression	Description
c	0	Diffusion coefficient
a	$\omega_0^2 (1 + \alpha p^2)$	Absorption coefficient
f	$\epsilon_0 \omega_0^2 (1 + \alpha p^2) m$	
e ₃	1	Mass coefficient
d ₃	2*delta	Damping/Mass coefficient
alpha	0 0	Conservative flux convection coeff.
beta	0 0	Convection coefficient
gamma	0 0	Conservative flux source term

Group:

Select by group

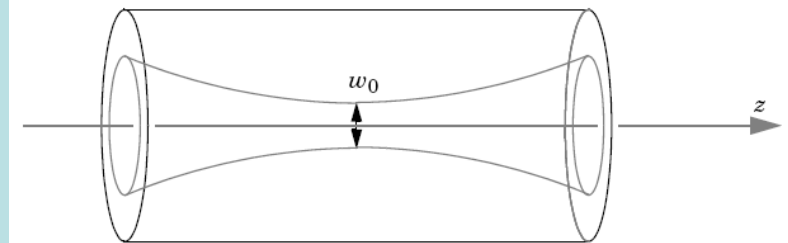
Active in this domain

OK Cancel Apply Help

Links the two parts of the model

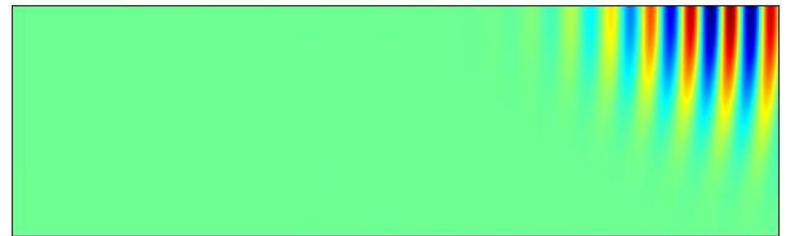
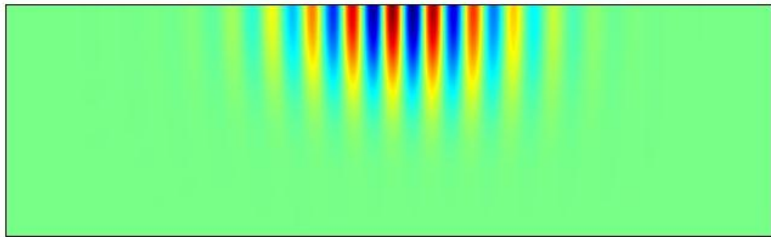
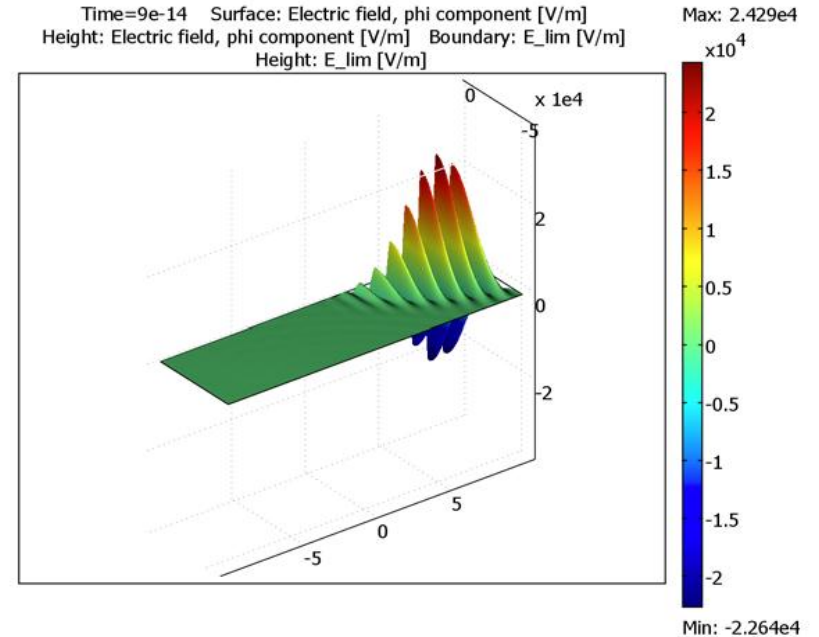
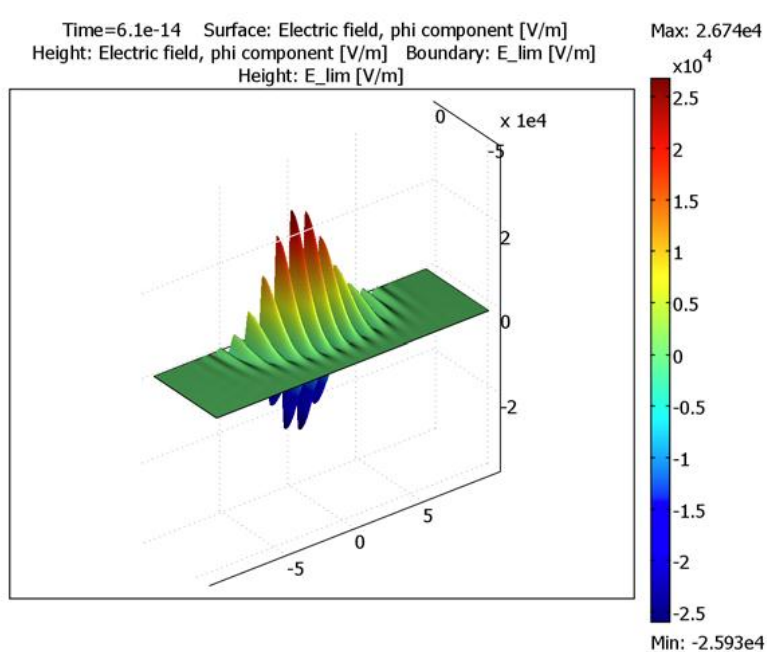
光学非线性效应

- 介质的折射率与光场的分布有关
- 举例：高斯光束的二倍频
 - 2D轴对称的使用（简化计算）
 - 支持复杂入射波形
 - 介质参数随场强分布变化，
$$\mathbf{D} = \mathbf{d11} * \mathbf{E}^2$$
 - 三阶非线性：
$$\mathbf{D} = \mathbf{d11} * \mathbf{E}^3$$
 - 瞬态分析
 - 与Matlab无缝连接

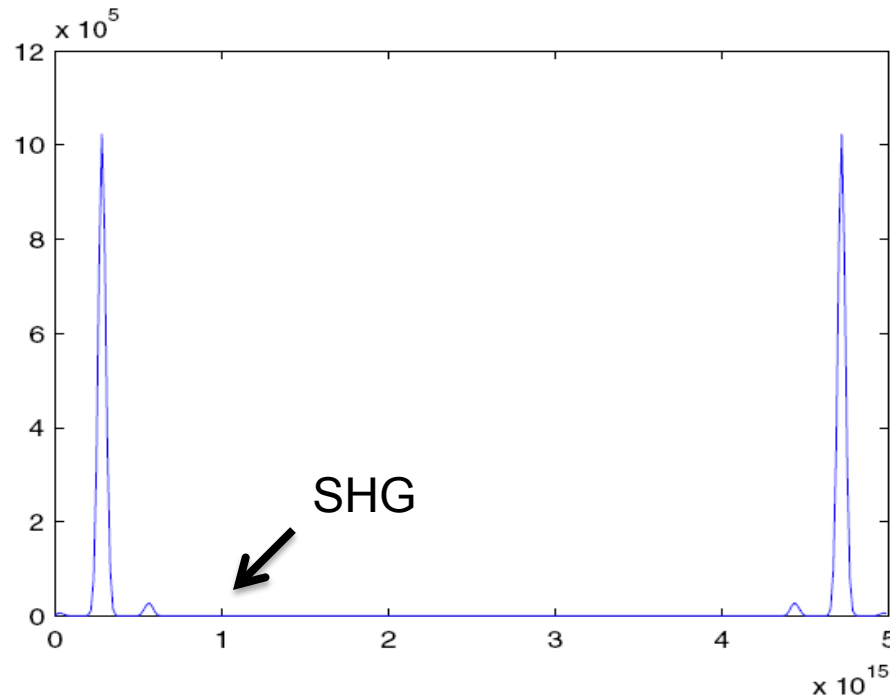


高斯光束的二倍频效应

瞬态分析：不同时刻下高斯光束在二阶非线性介质中的传播



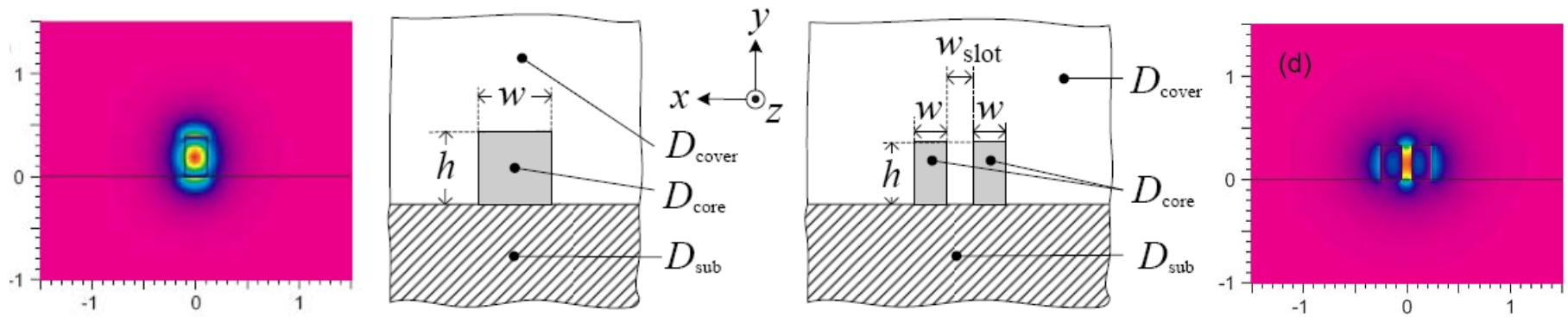
与Matlab配合的后处理



FFT made by Matlab at the output boundary

利用**Matlab**在输出边界做快速傅立叶变换（**FFT**）
可以看到信号光频率和新产生的倍频光频率分量

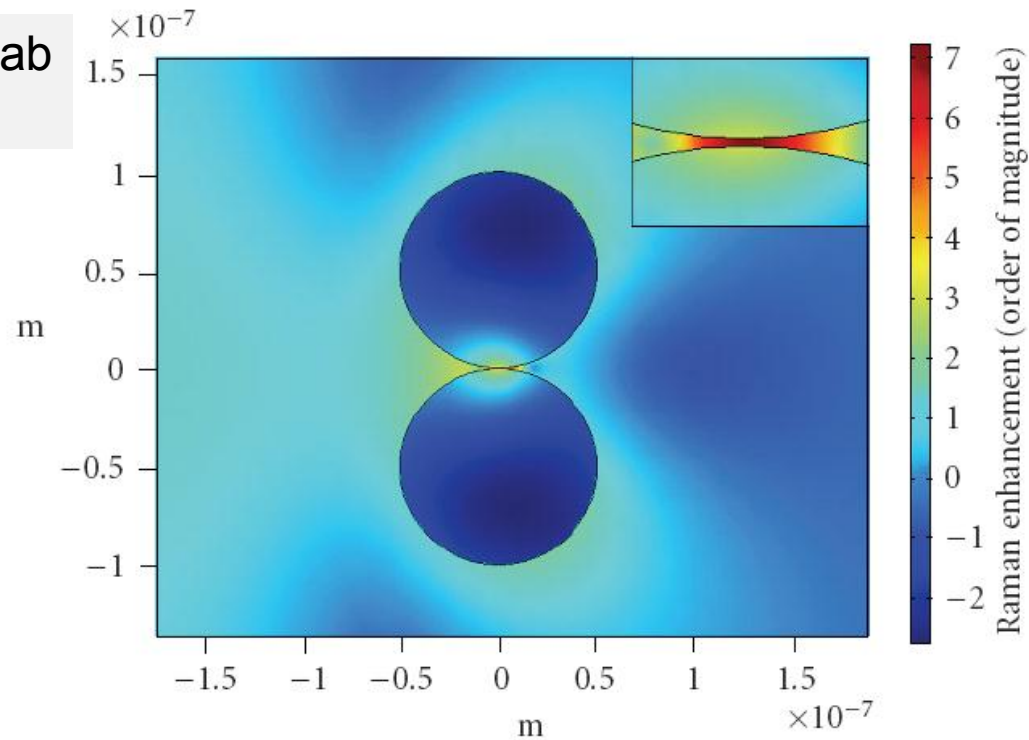
波导的模场分析



- confine the light to sub wavelength scale
- Ultra-small mode effective area and highly nonlinear

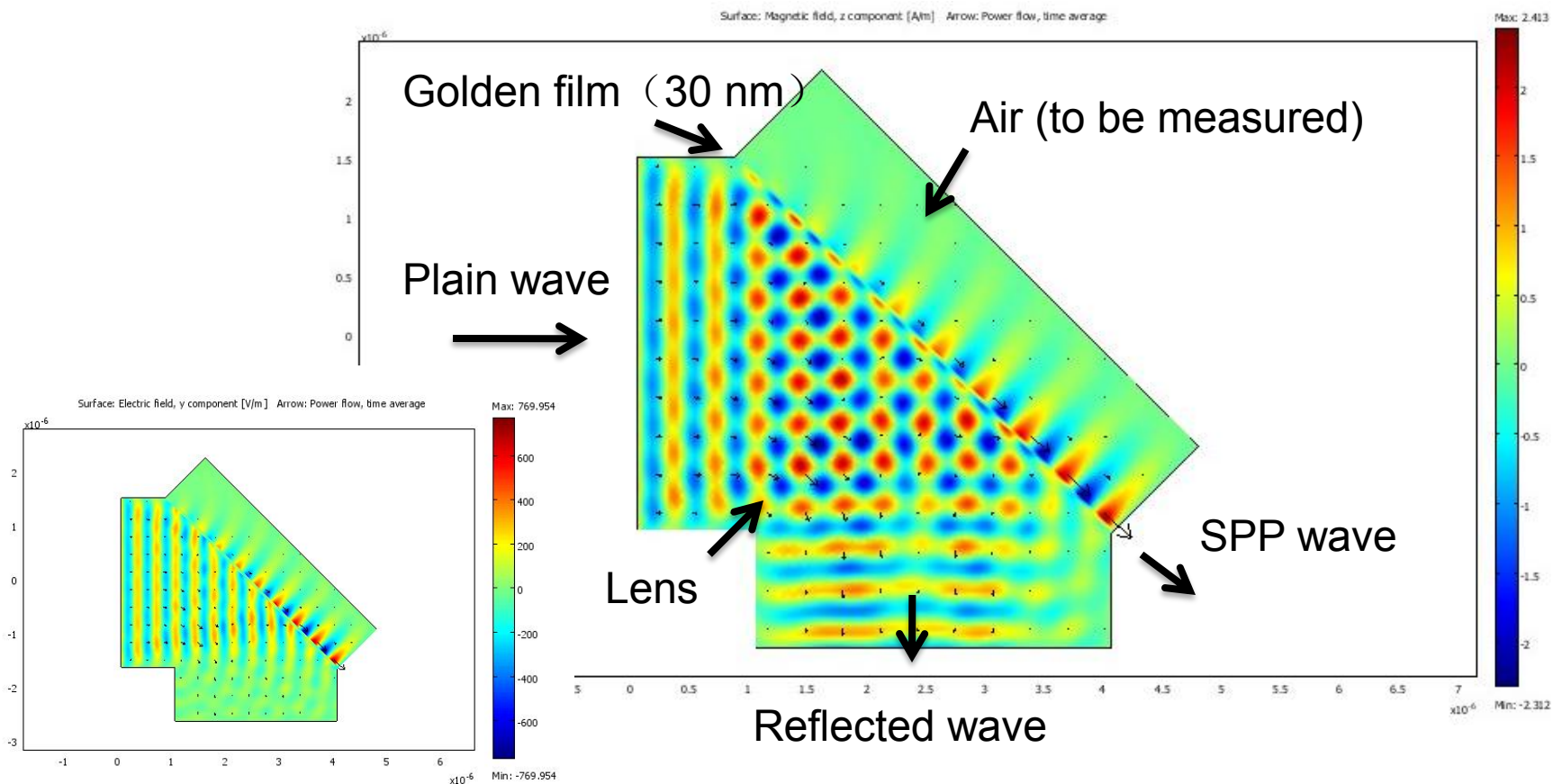
表面拉曼增强

National physics Lab
Great Britain



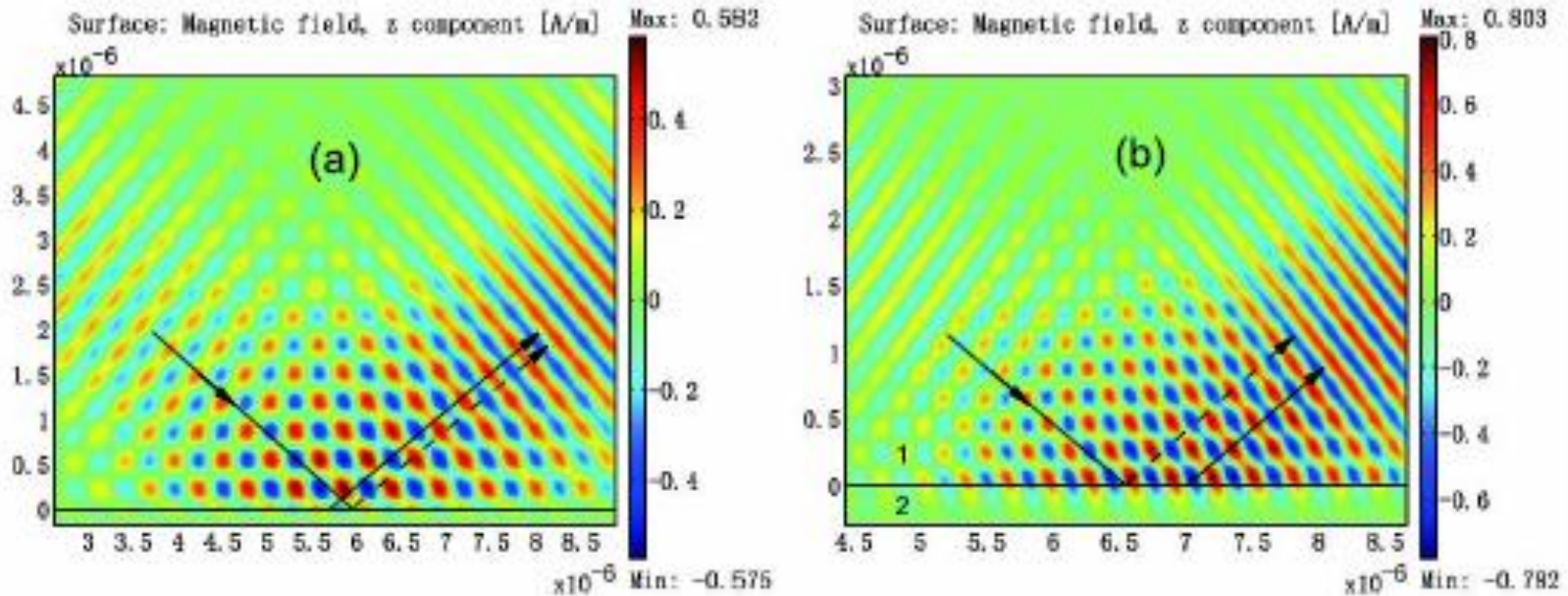
Nano scale metal spheres significantly confine the light the narrow interface between the metal and dielectric medium.

表面等离子振荡 (SPR)



Transmittance and reflectance can be calculated by boundary integration.

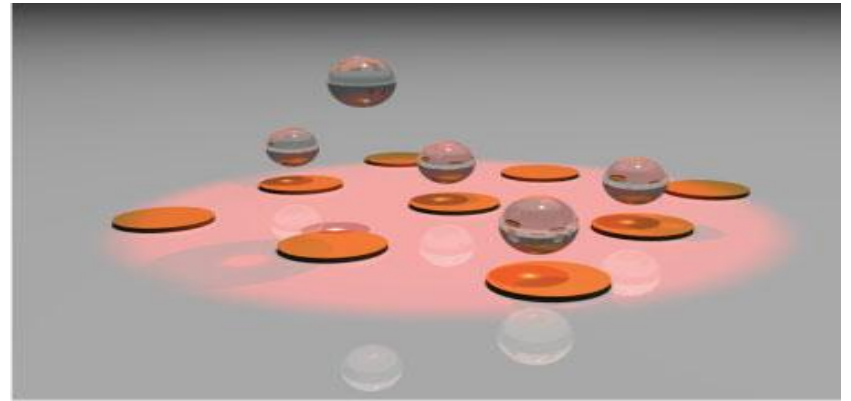
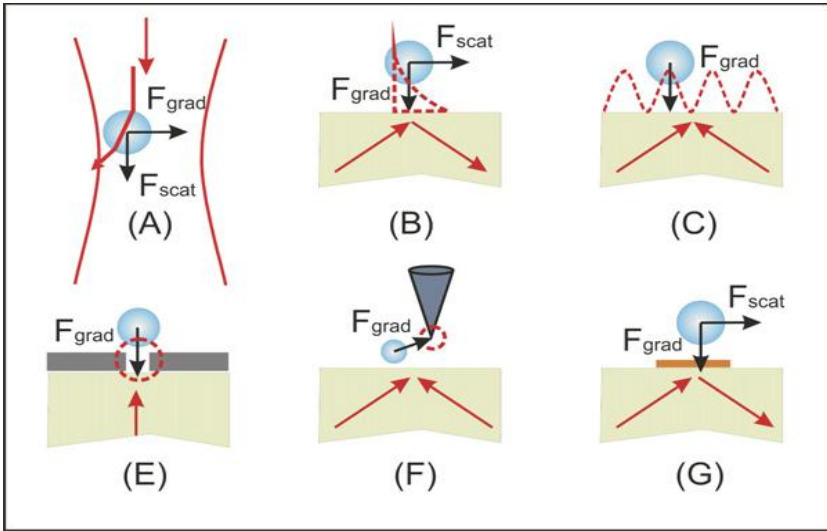
温度敏感的Hoos-Hanchen位移



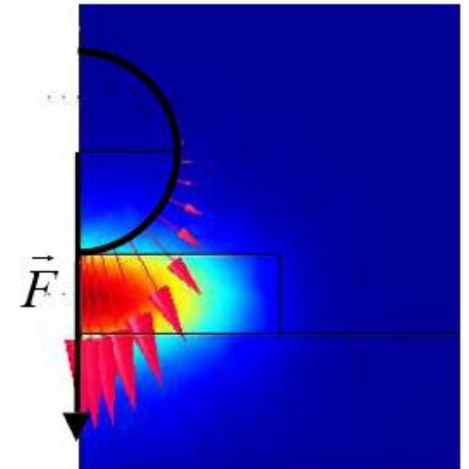
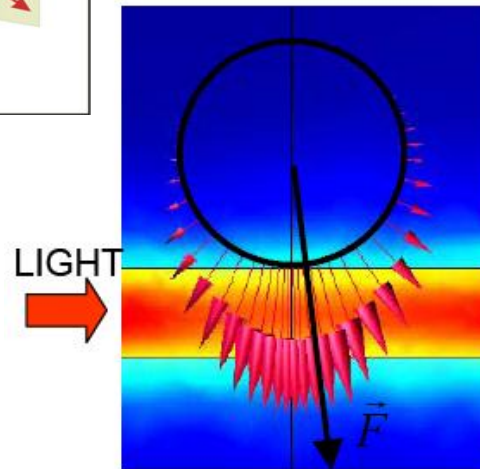
COMSOL Multiphysics simulation of the GH shifts for two Gaussian-shaped beams:
(a) $\lambda = 413\text{nm}$ and $\theta = 50$ degrees ($\epsilon_e = -1.62+1.74i$);
(b) $\lambda = 248\text{nm}$, and $\theta = 54$ degrees ($\epsilon_e = 0.563+0.148i$).

Bin zhao and Lei Gao, *Opt. Express*, **17**, 21433 (2009).

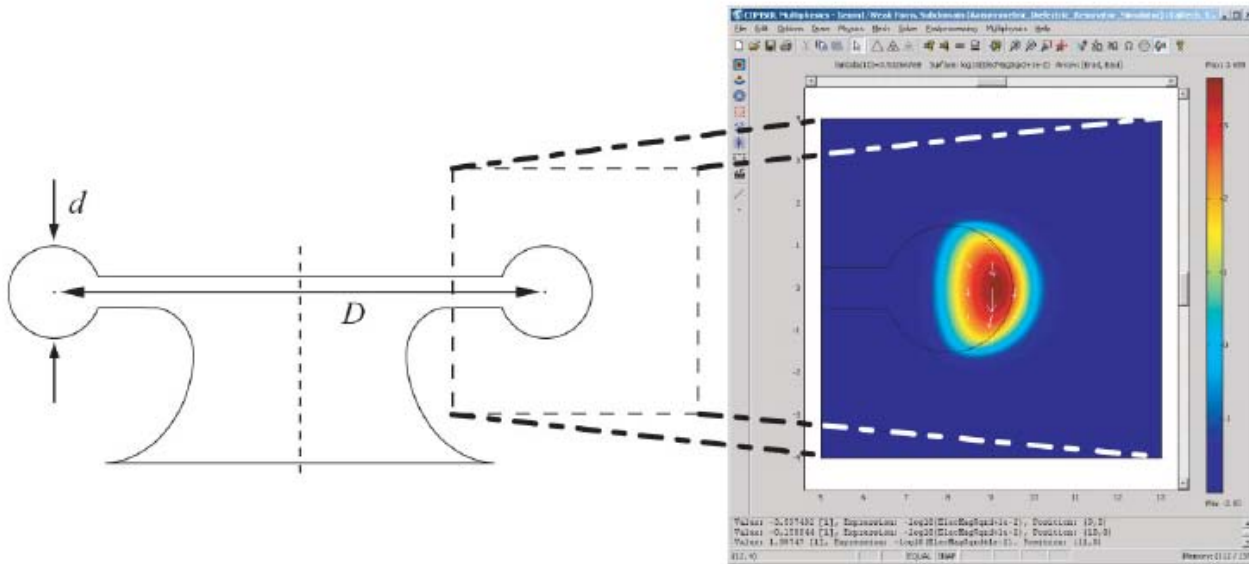
光致力效应



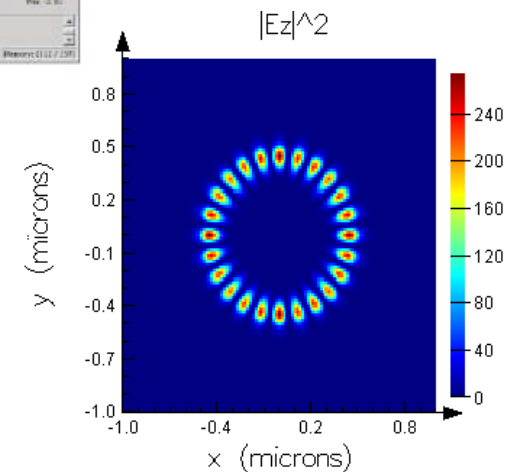
Optical field concentration leads to the significant grad distribution, which induces a force vector.



微谐振腔计算

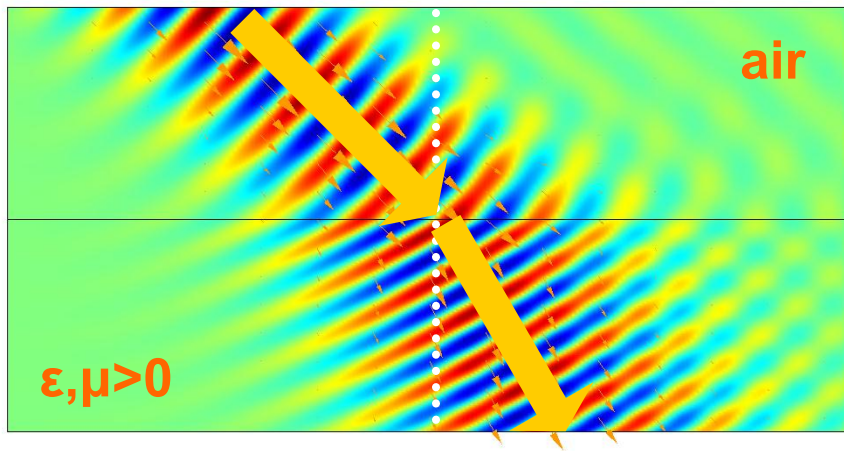


High Q resonator:
Microsphere
Micro ring resonator

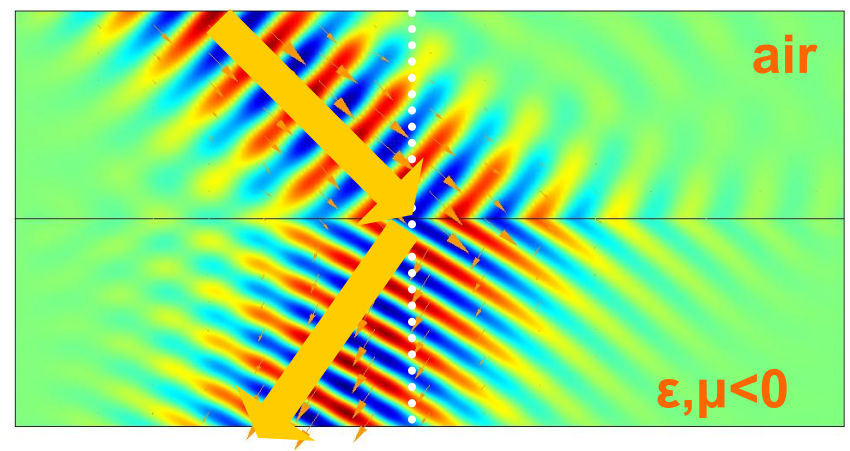


负折射

正常折射



负折射



光子晶体波导

- 全新的导波模式：利用光子带隙导波
- 设计灵活、性能优异
- 周期性结构：蝴蝶的翅膀、布拉格光栅
- 光子晶体波导
- 光子晶体光纤

鲍鱼壳：1D光子晶体



蝶翅：2D光子晶体



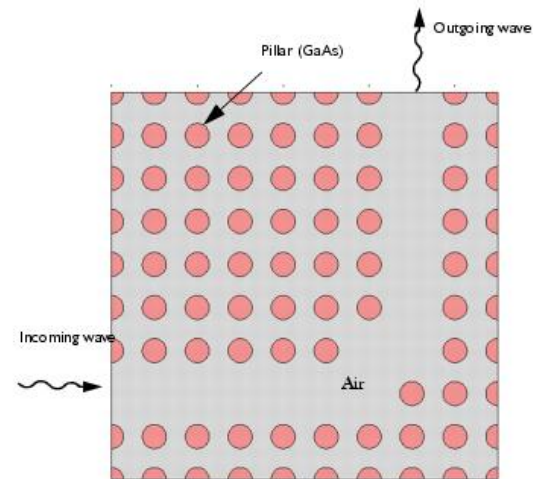
蛋白石：3D光子晶体

光子晶体波导

光子晶体中引入缺陷，形成波导结构

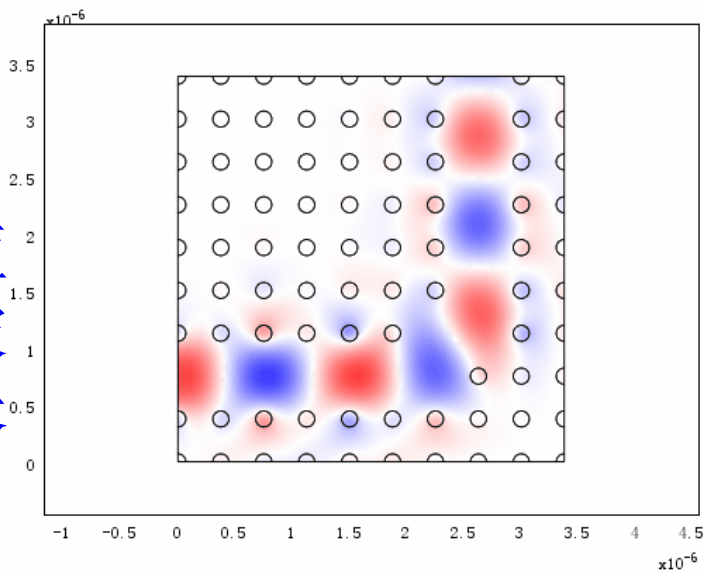
波长变化，材料折射率也不同

本模型模拟了不同波长的光在光子晶体波导中的传输



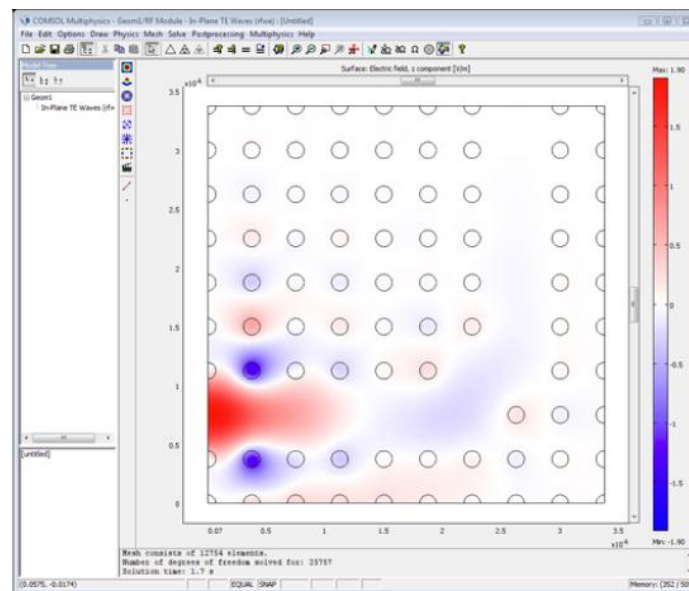
短
波
长

表面: 电场, z 分量 [V/m]



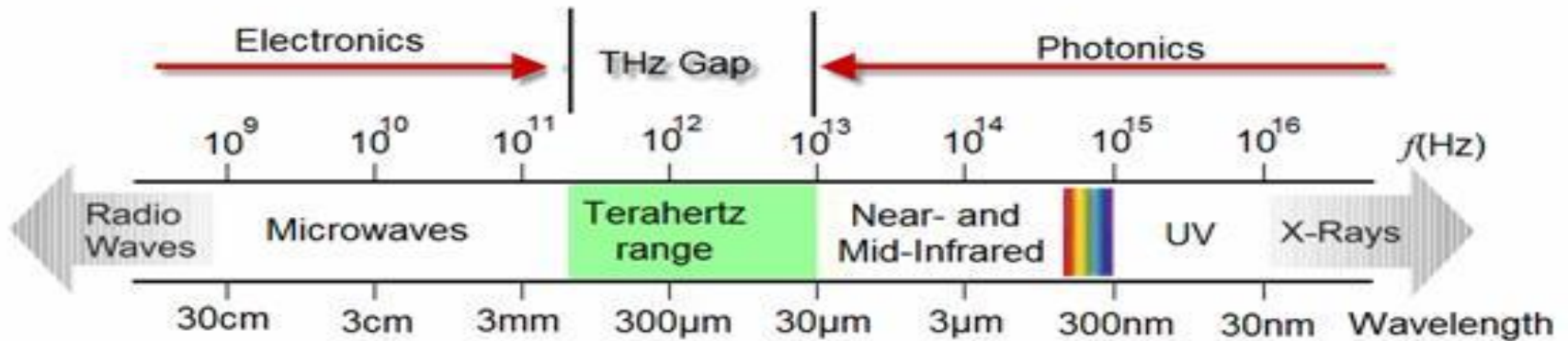
最大值: 1.90

最小值: -1.90

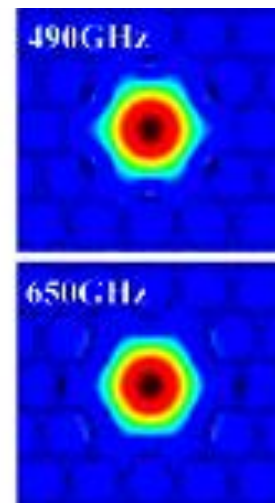
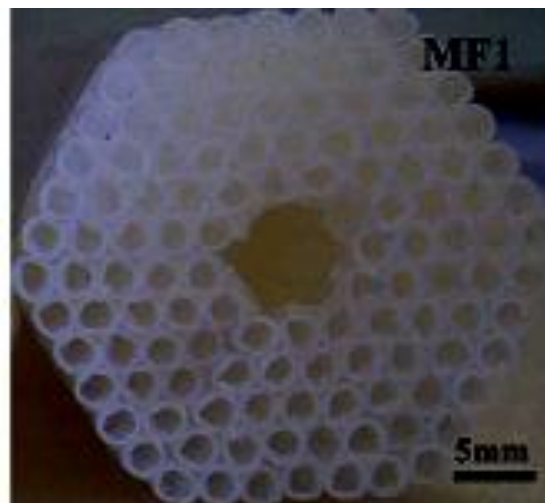
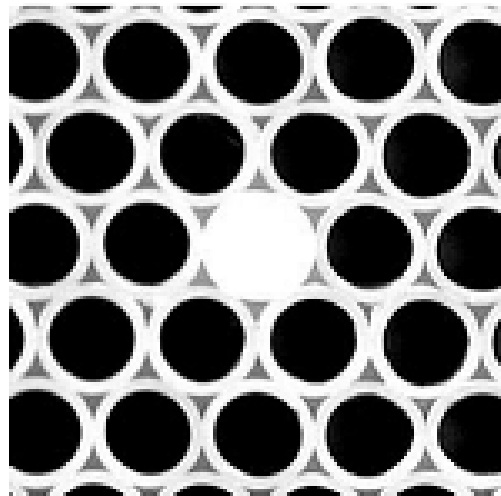


长
波
长

太赫兹波（**terahertz, THz**）是指频率从**0.3THz**到**10THz**的相干电磁辐射，对应的波长为**30 μ m**到**1mm**，在光学领域也被称为远红外辐射，它介于红外波与毫米波之间，在长波长处与毫米波重合，在短波长处与红外波重合，它们均为电磁波谱的一部分（图1.1所示）。太赫兹波处于射频（**RF**）微波技术与光子学技术交叉频段，历史上由于缺乏有效的产生和探测的手段，长时间没有被人涉足，从而形成太赫兹空白（**Terahertz Gap**），成为人类最后一块未开发的波谱段。

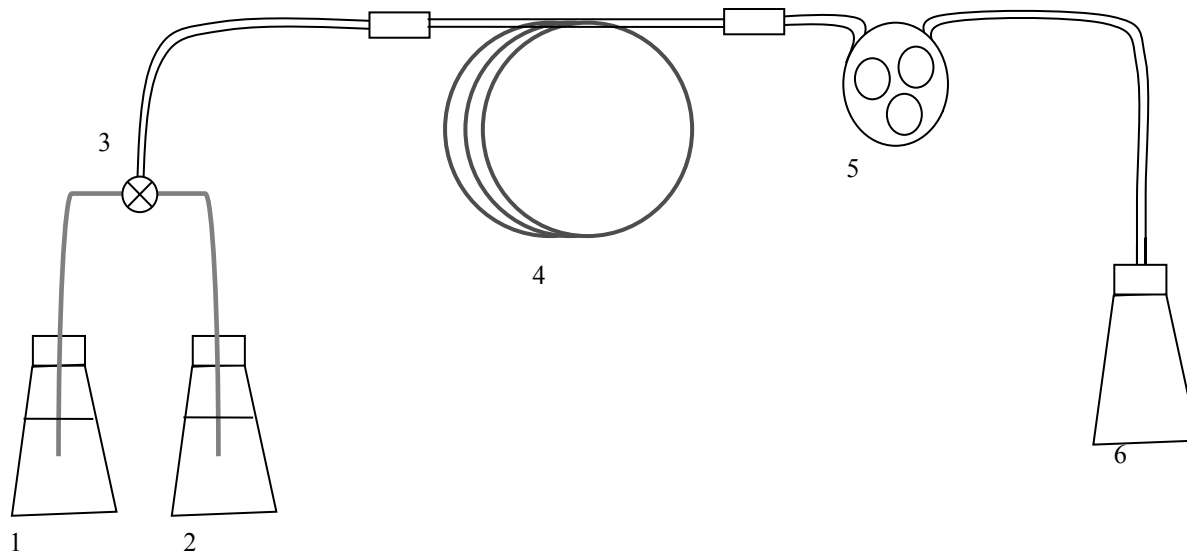


THz在光子晶体光纤中的传输特性



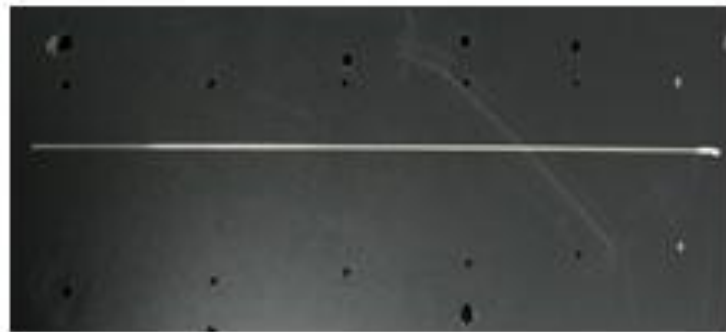
实心光子晶体光纤与空心THz光子带隙光纤

THz波金属镀层空芯波导

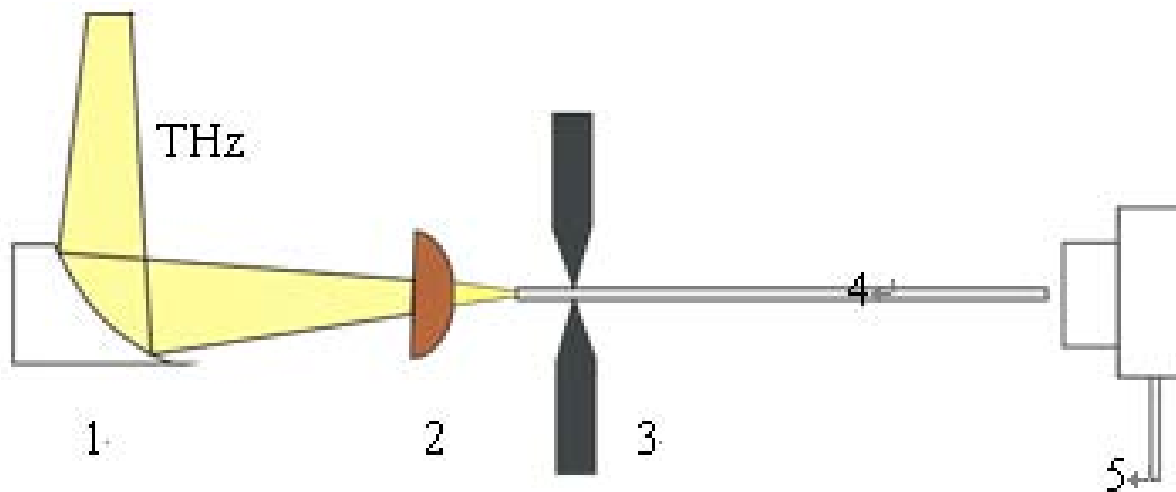


金属层镀制装置简图

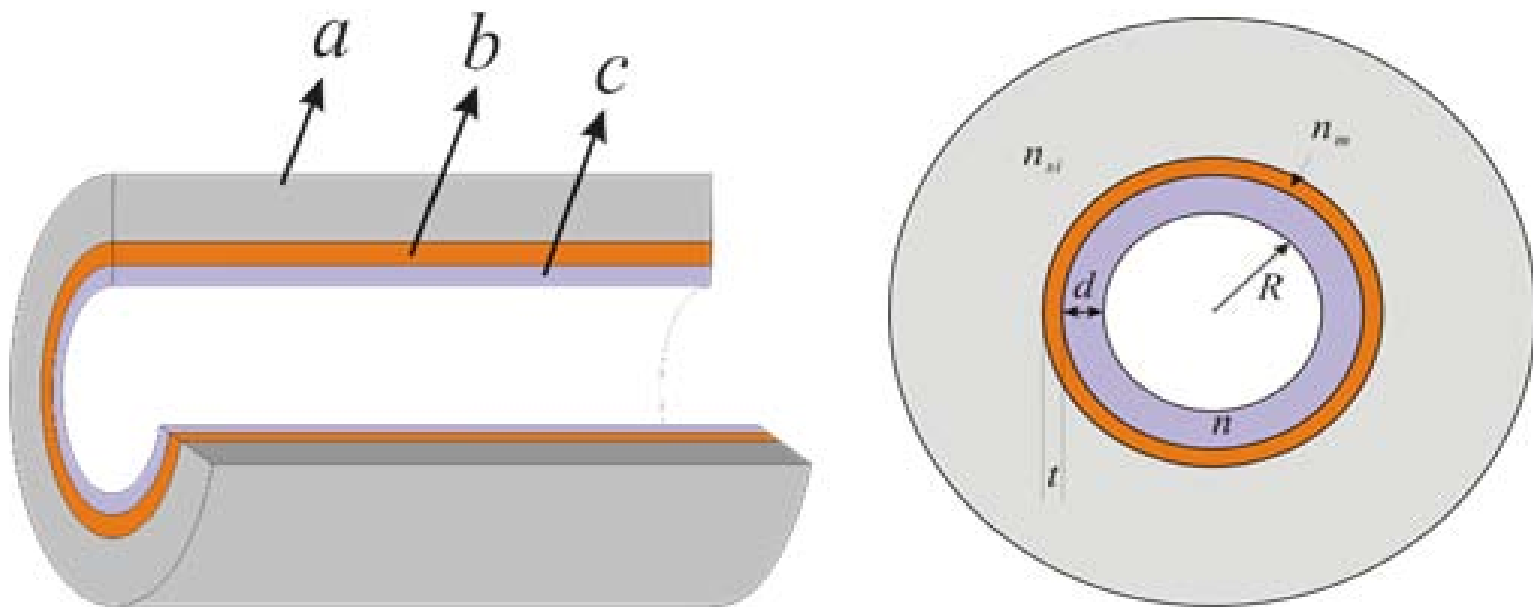
1. 硝酸银溶液 2.还原剂 3.阀门 4.玻璃管 5.泵 6.废液



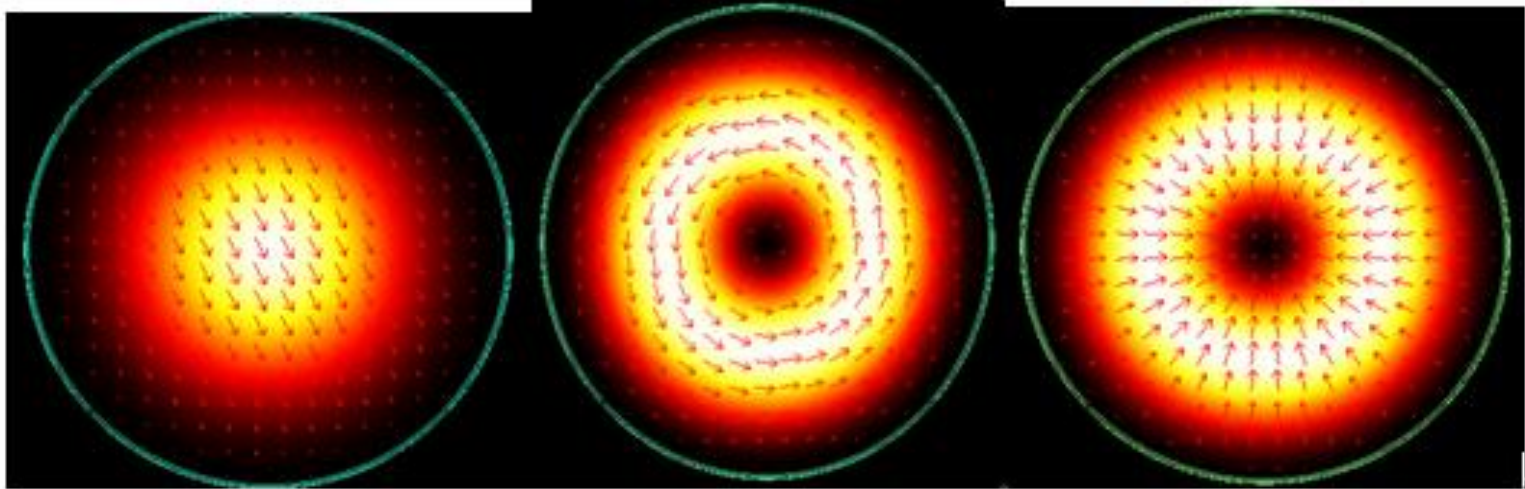
镀银空芯光纤的实物图



1. 金属抛物面镜；
2. 聚乙烯透镜；
3. 金属支架；
4. 镀银空芯光纤；
5. 远红外功率计



镀银/介质膜空心波导示意图



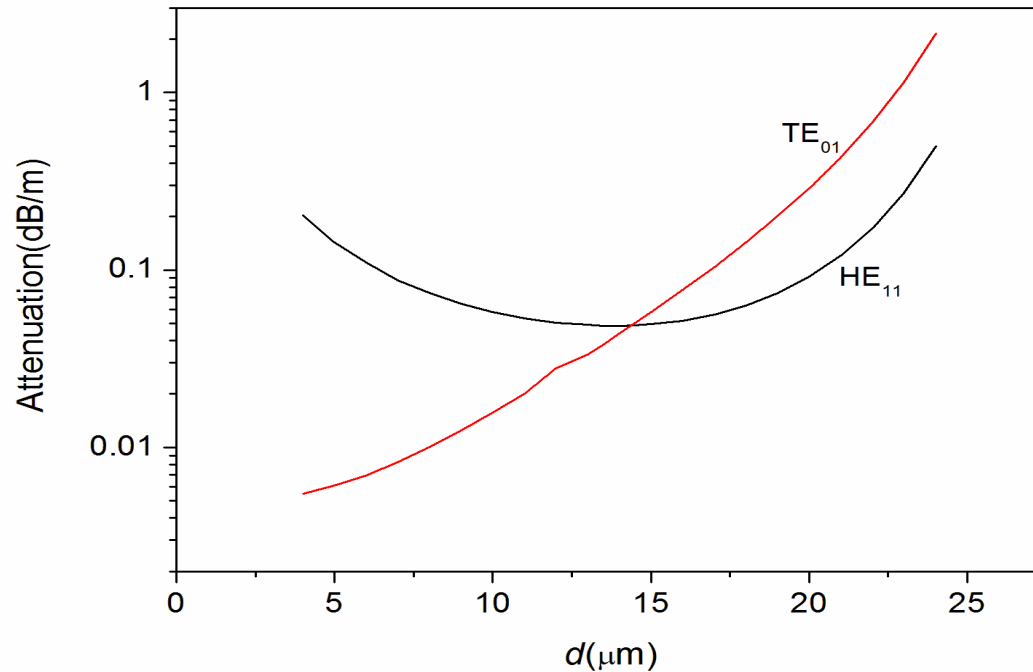
HE11

TE01

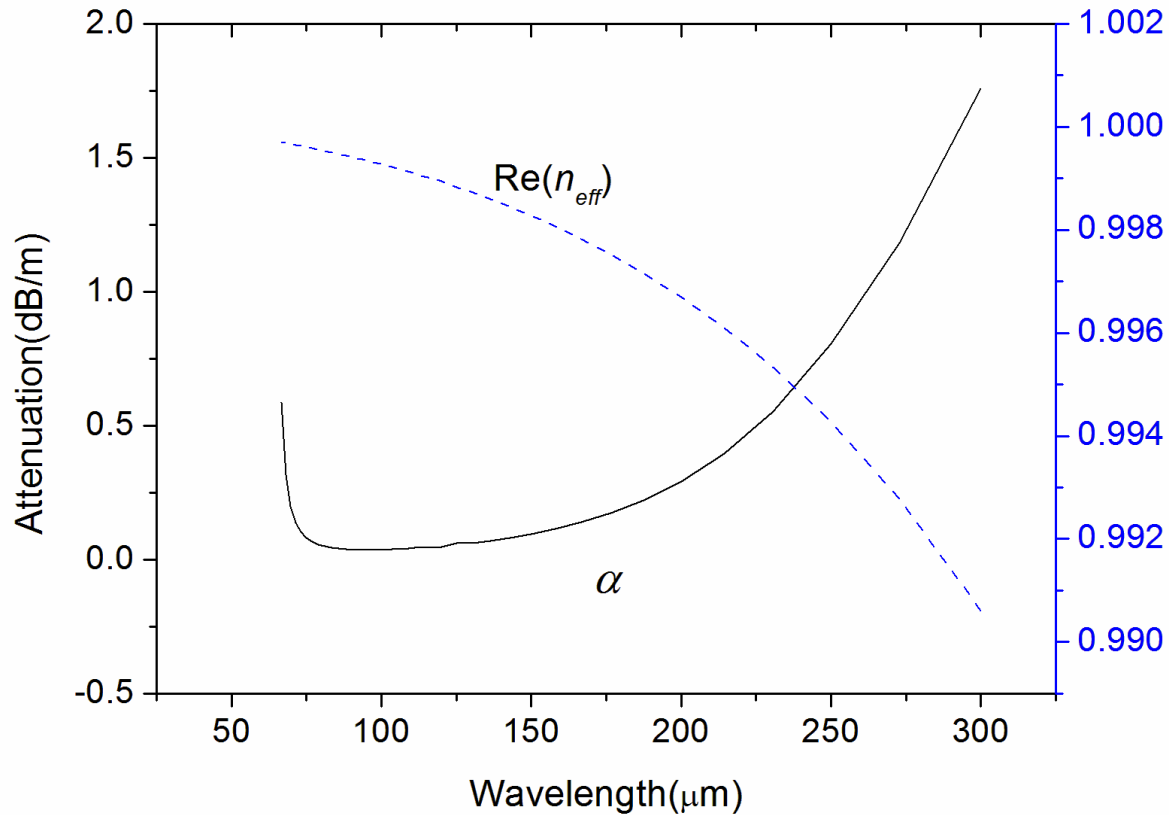
TM01

模场强度

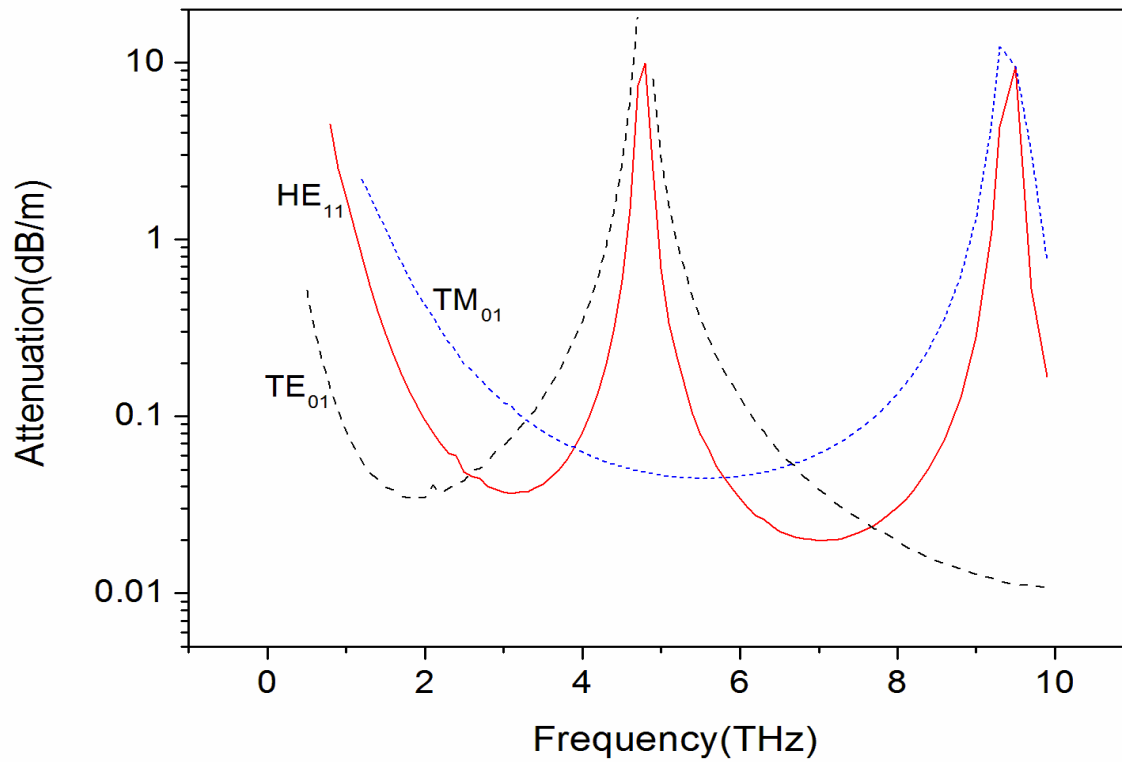
传输实验结果



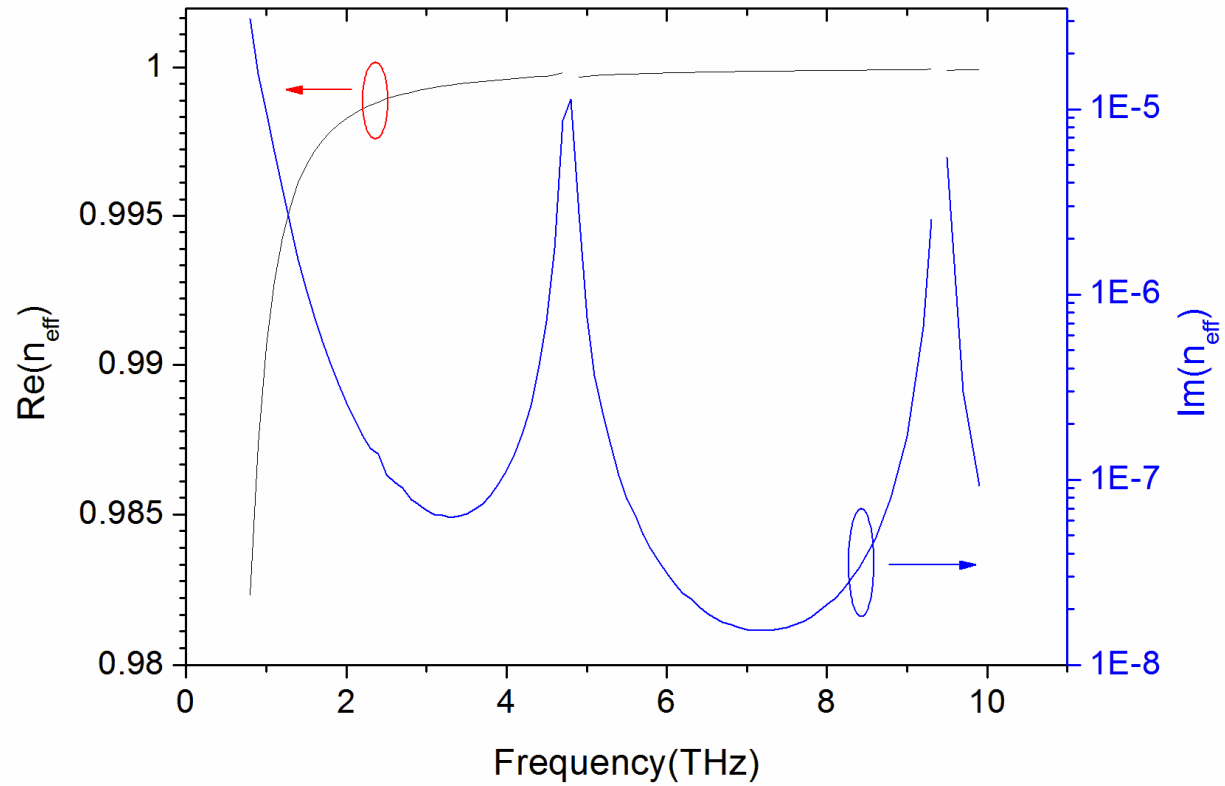
传输损耗随PE厚度的变化情况 ($n_{PE}=1.5-0.000947j$)



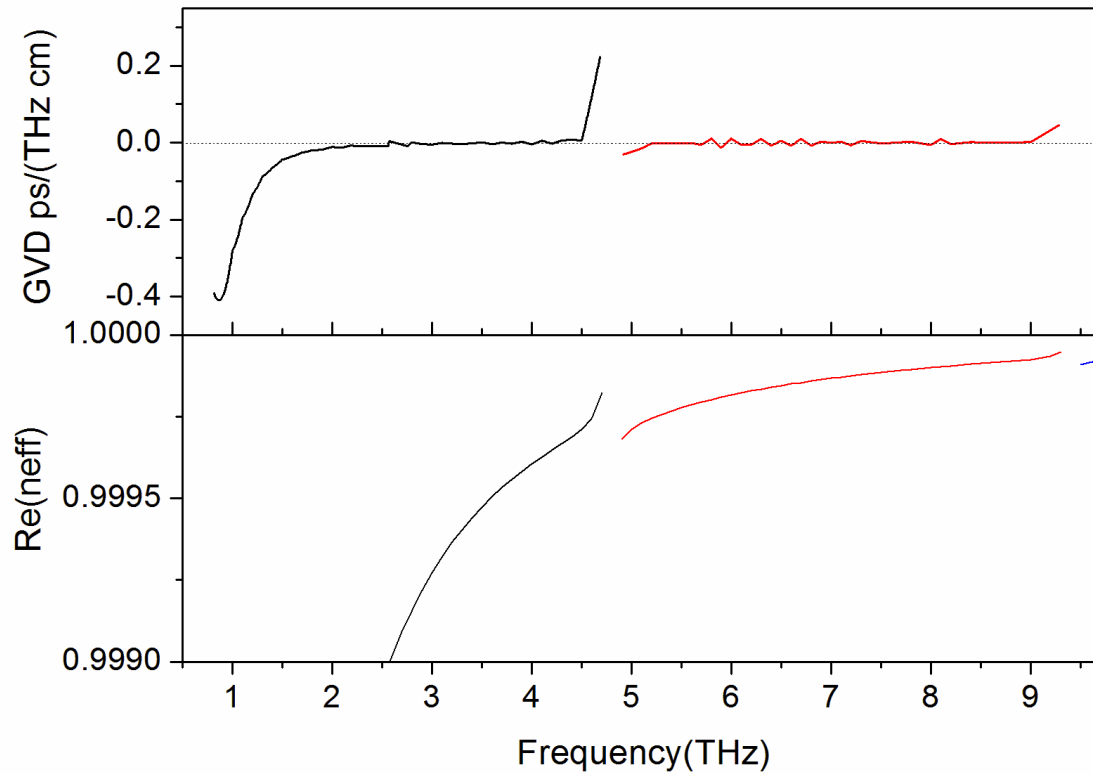
HE11模传输损耗随波长的变化



HE11、TE01和TM01传输损耗随THz波频率的变化

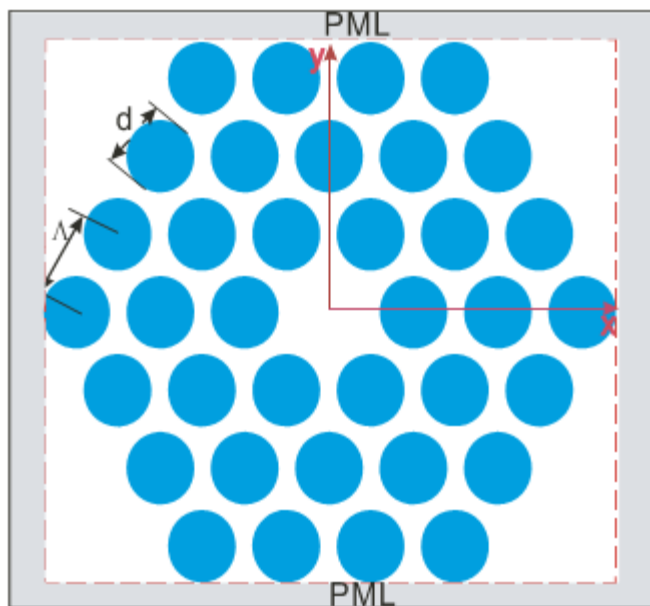


HE11模式的有效折射率

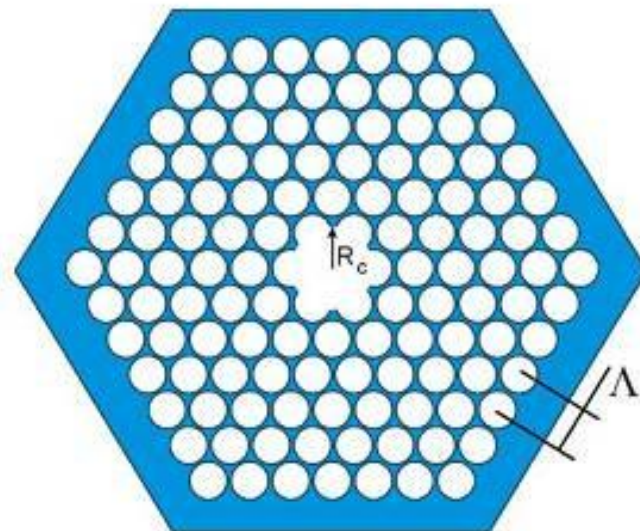


HE11模的群速度色散系数

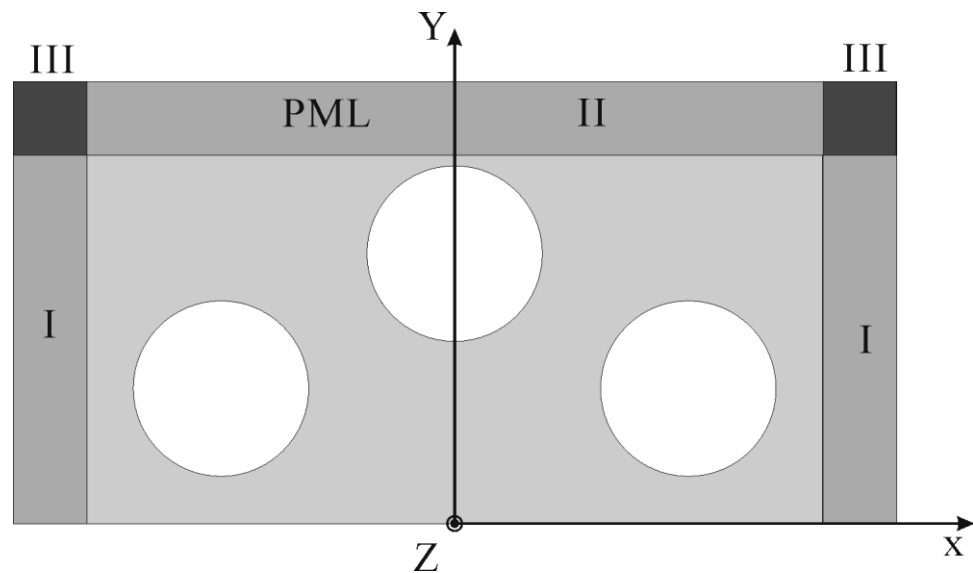
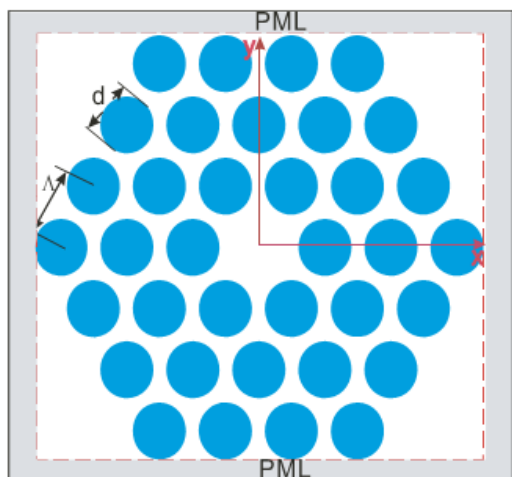
低损耗THz微结构光纤的设计



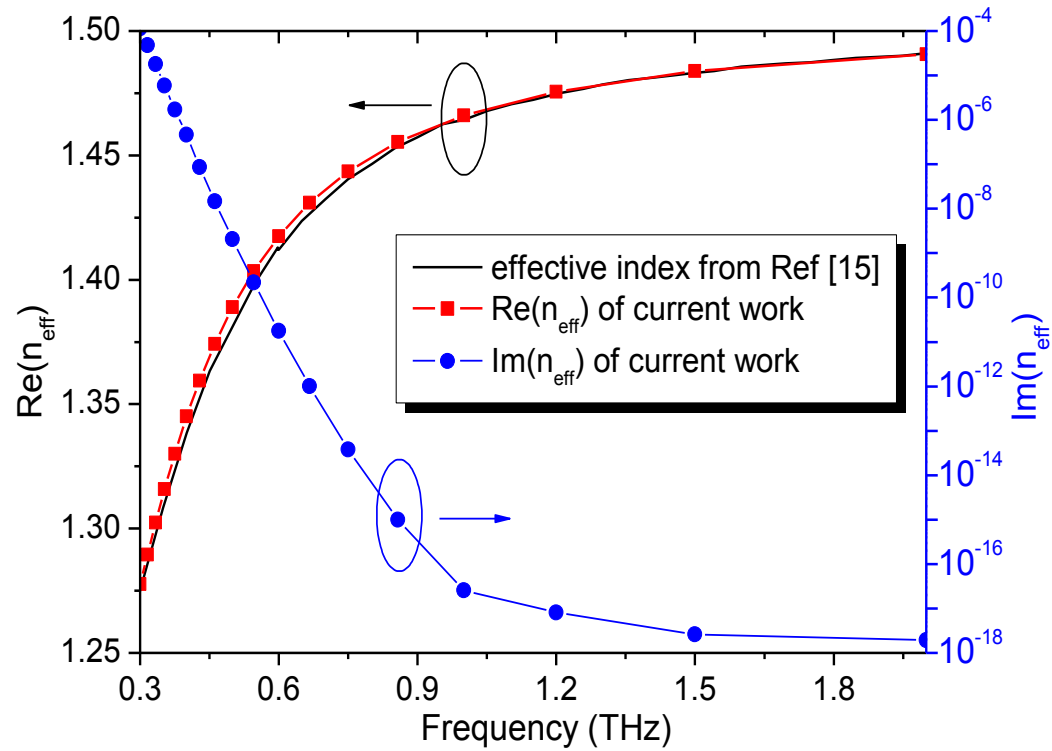
THz光子晶体光纤的横截面结构示意图



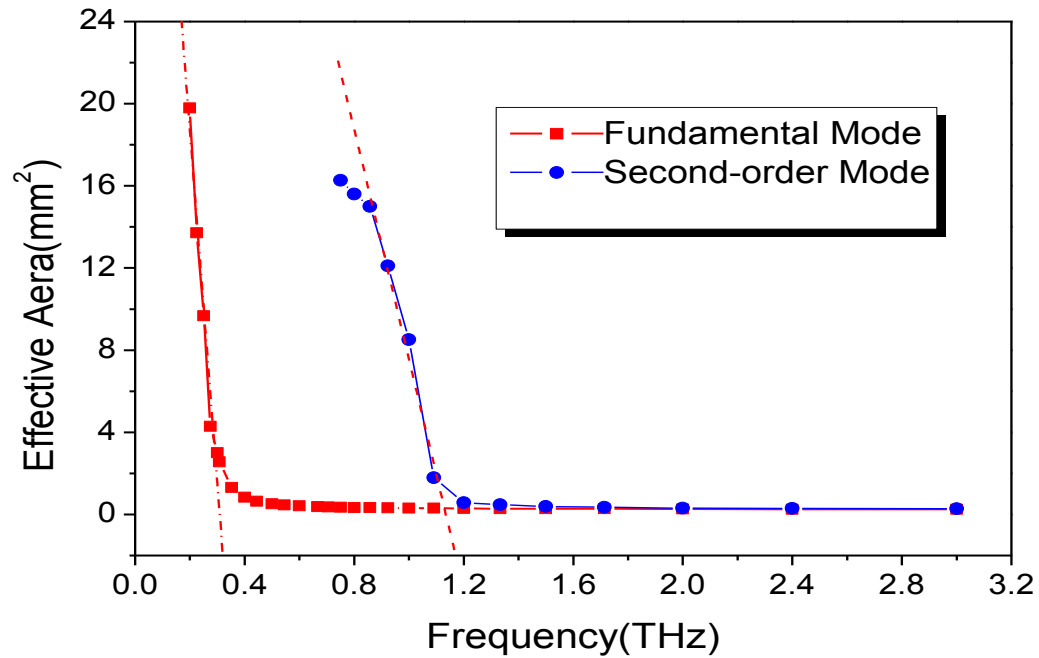
太赫兹光子带隙光纤横截面结构示意图



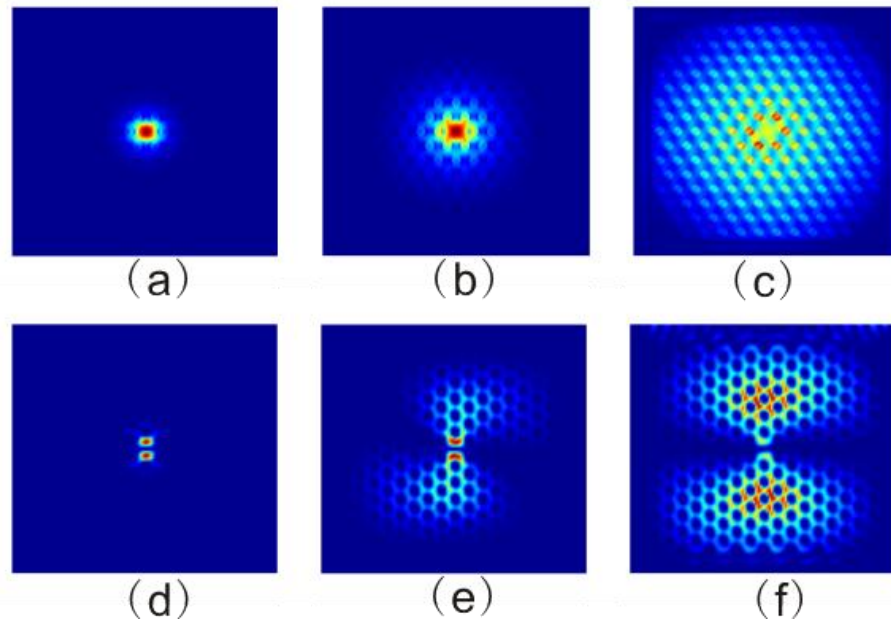
帶有完美匹配层的计算窗口示意图



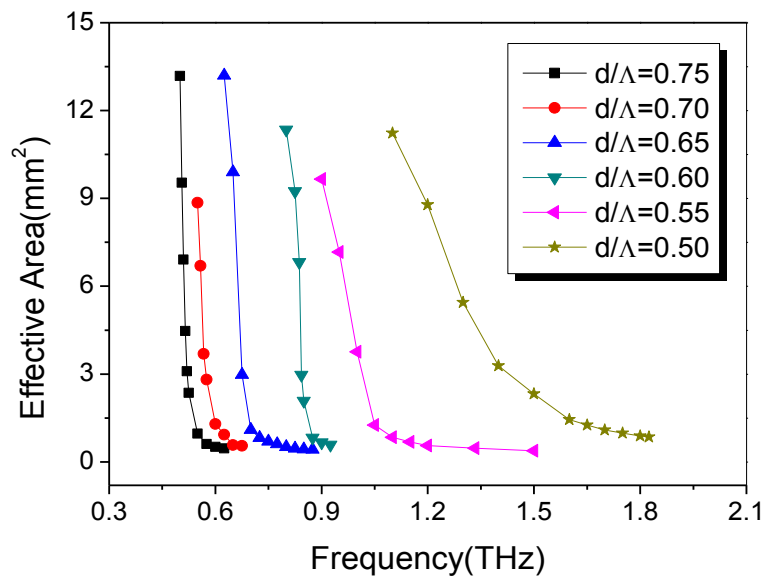
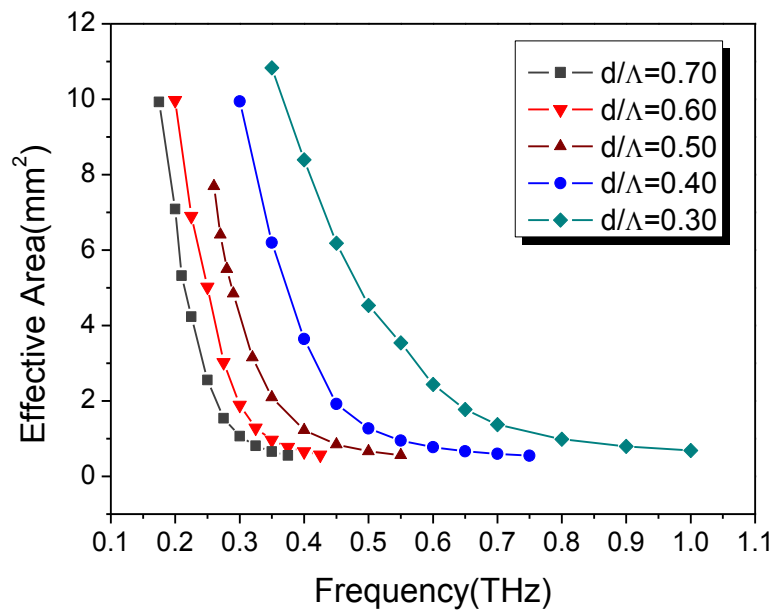
TPCF基模的有效折射率



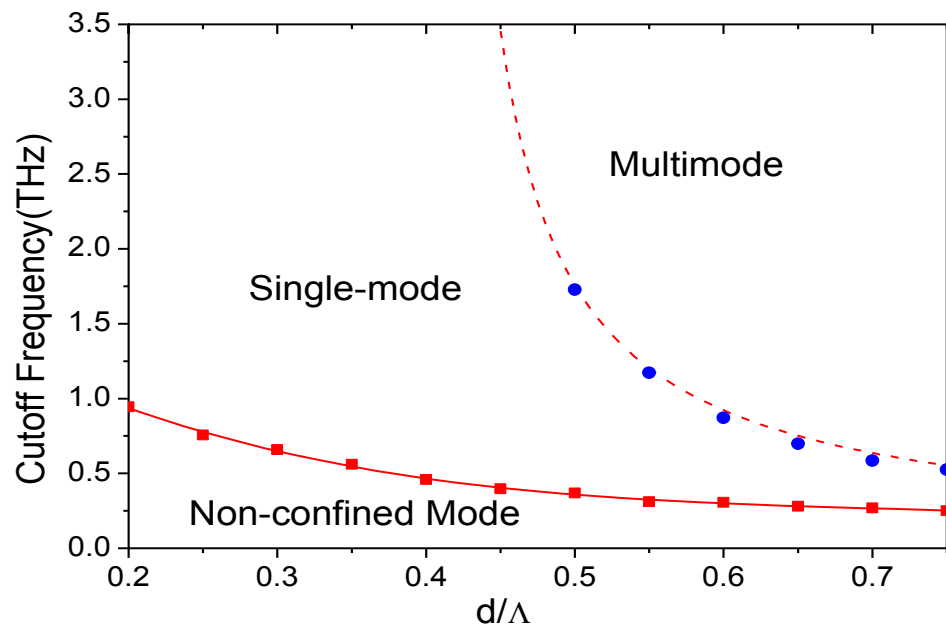
模式有效面积随THz频率的变化



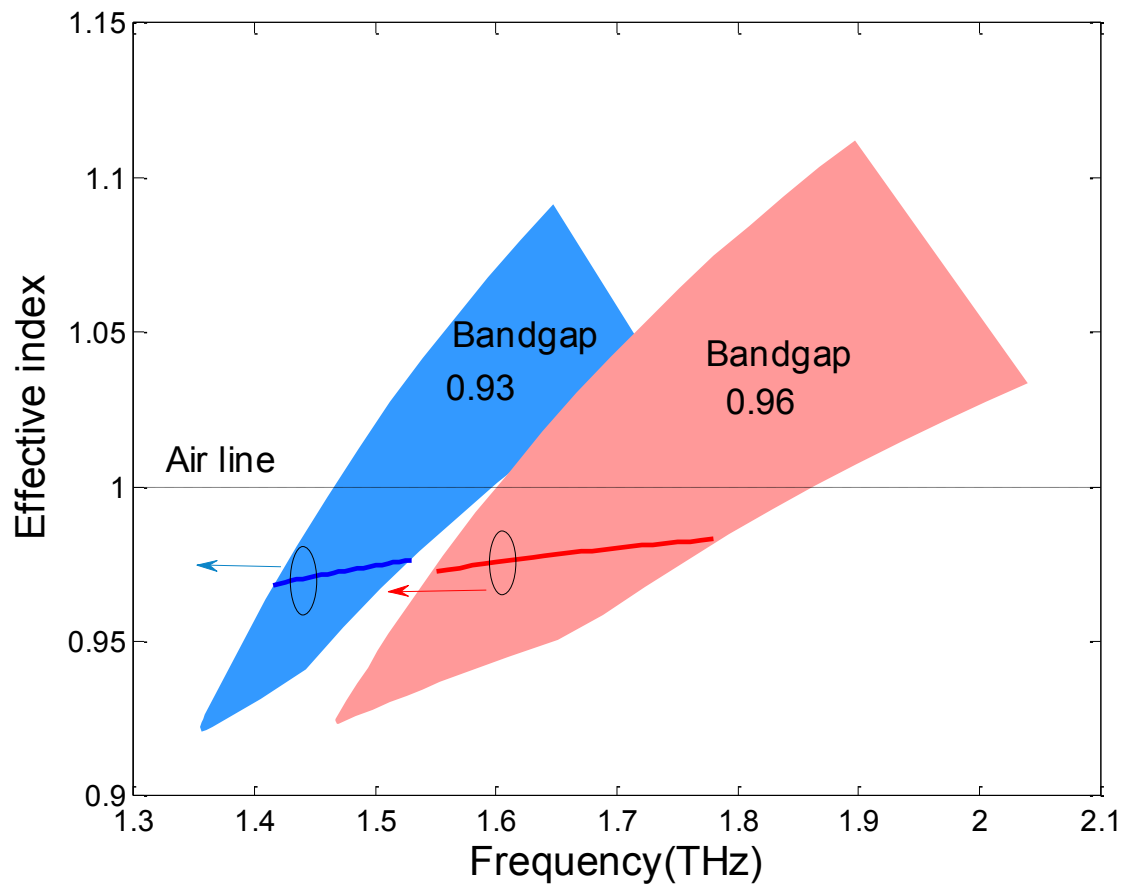
基模和二阶模模场随频率的变化情况，(a) - (c) 频率为 0.33THz、0.25THz和0.15THz，对应的面积分别为1.70 mm²，9.67 mm²和29.2mm²；(d) - (f) 的频率分别为 1.2THz、1THz和0.93THz，对应的面积分别为0.56mm²，8.6 mm²和12.1mm²



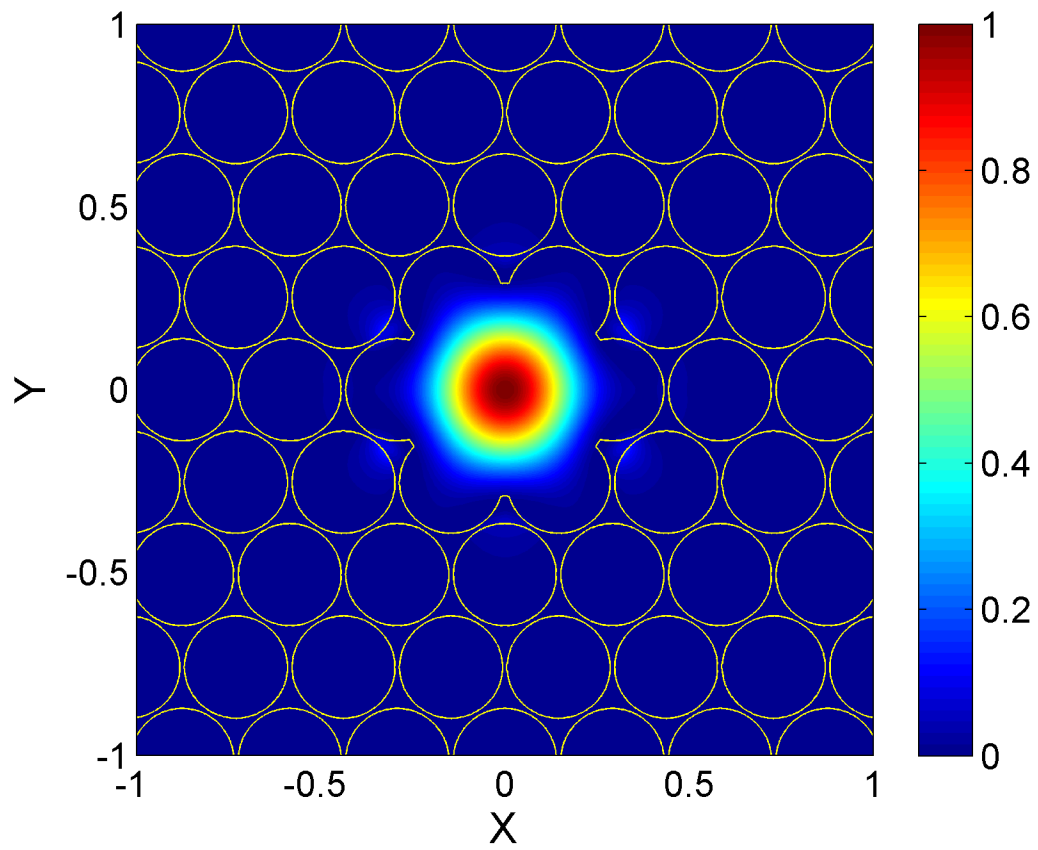
HE11模和TE01模式的面积随THz波频率的变化情况 ($\Lambda=500\mu\text{m}$)



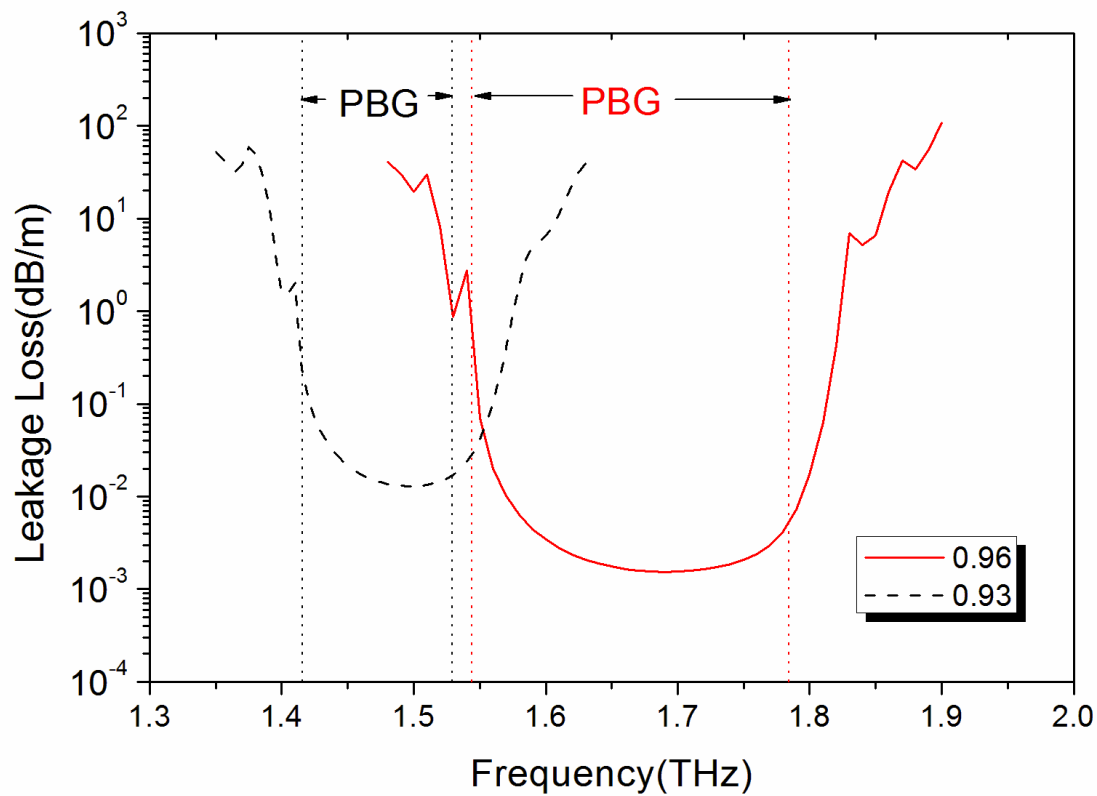
单模运转相图



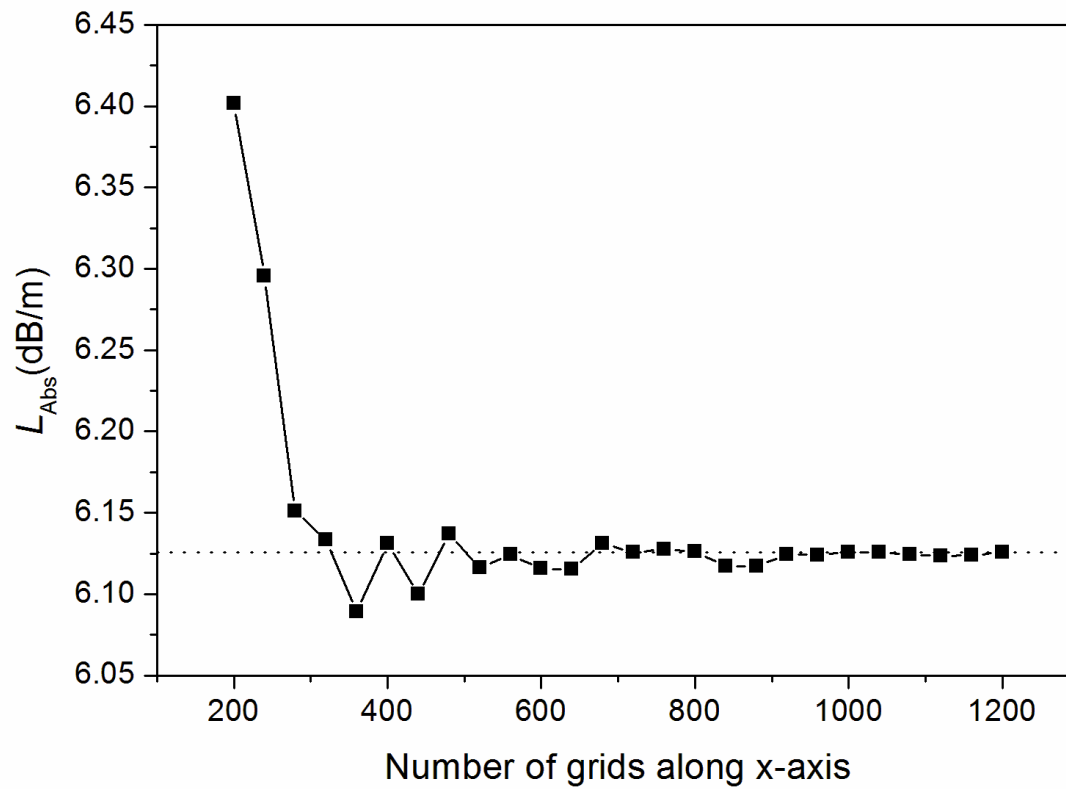
光子带隙边界与模式色散曲线
 ($\Lambda=292 \mu\text{m}$; $d/\Lambda = 0.93$ and 0.96)



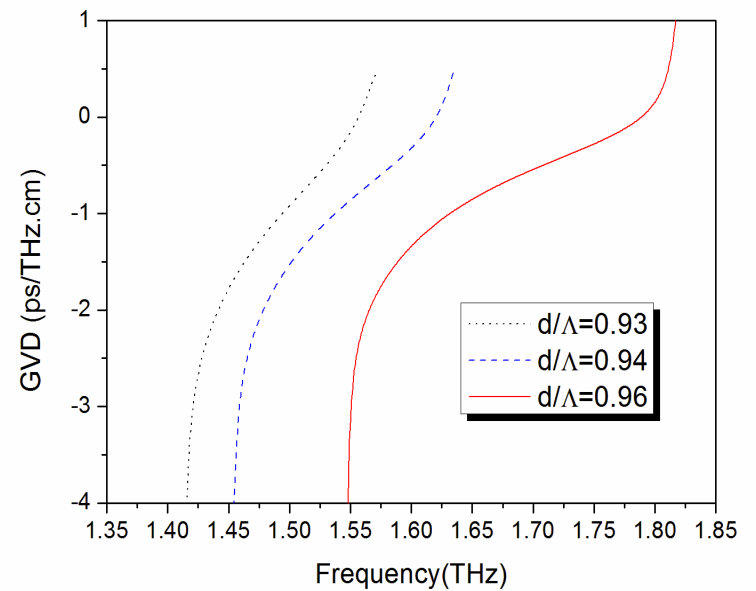
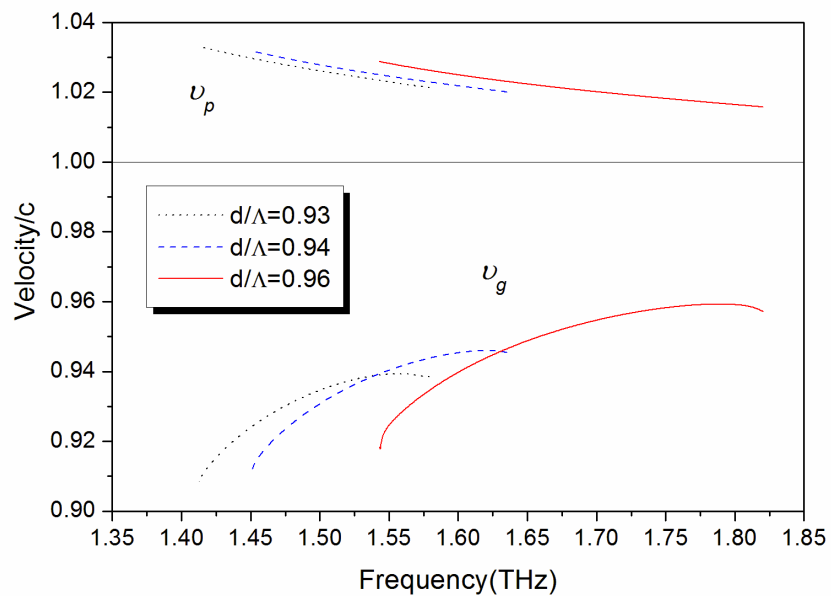
归一化HE11基模横向强度分布 ($f=1.69$ THz , $d/\Lambda = 0.96$, $\Lambda = 292 \mu\text{m}$)



HC-TPBF中的泄露损耗 ($d/\Lambda=0.96$ 和 0.93)

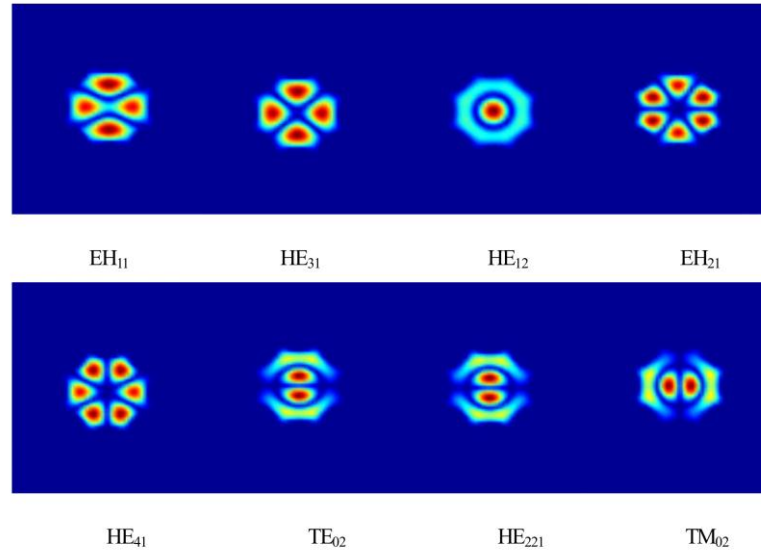


吸收损耗的收敛情况 ($\Lambda=292\mu\text{m}$, $d/\Lambda=0.96$, $f=1.75\text{THz}$)

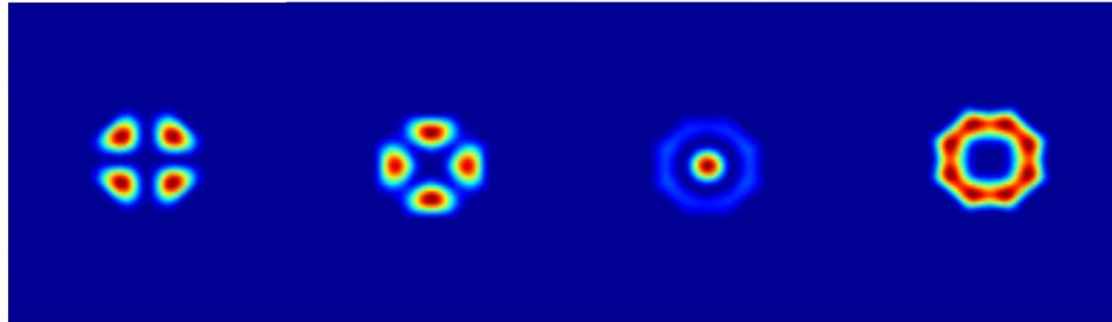


HC-TPBF中的群速度与相速度 (a)

群速度色散系数 (b)



3—5阶模的x分量电场强度分布图

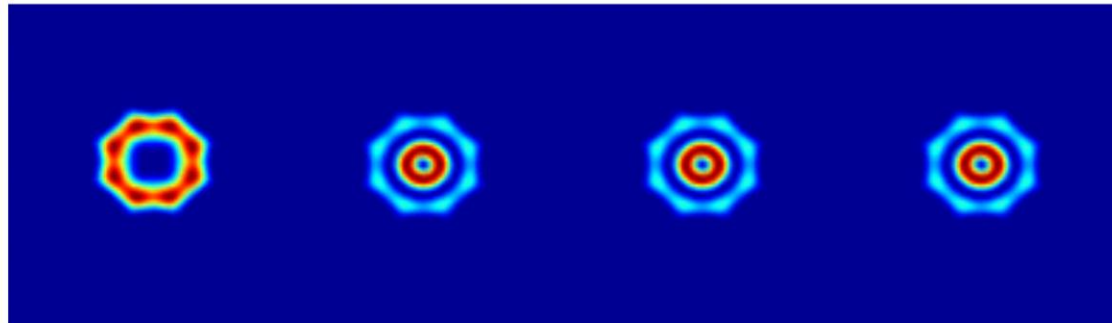


EH_{11}

HE_{31}

HE_{12}

EH_{21}



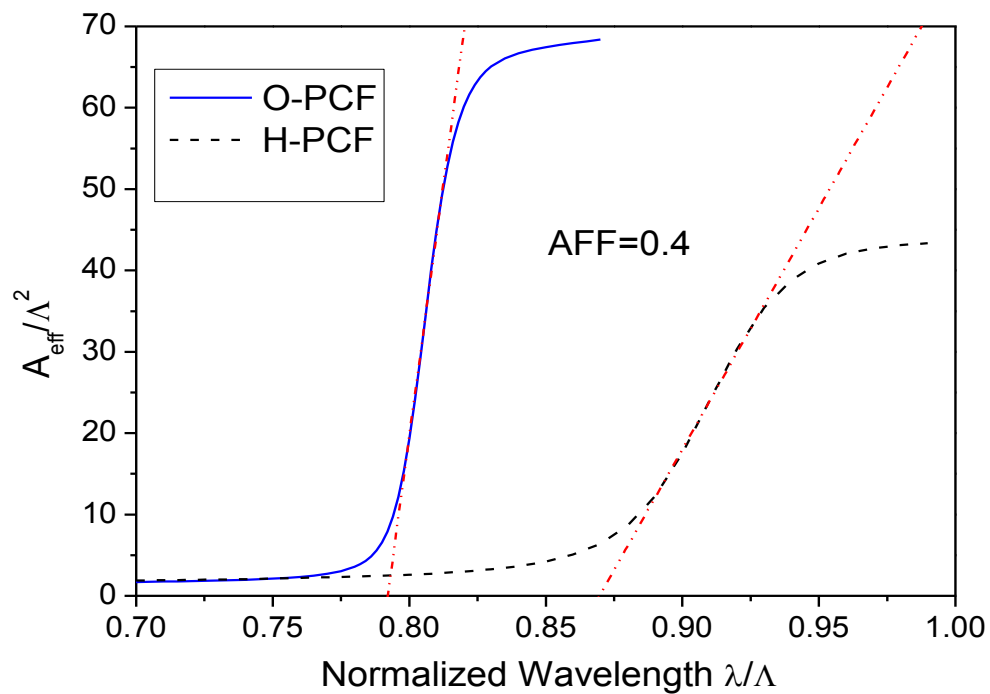
HE_{41}

TE_{02}

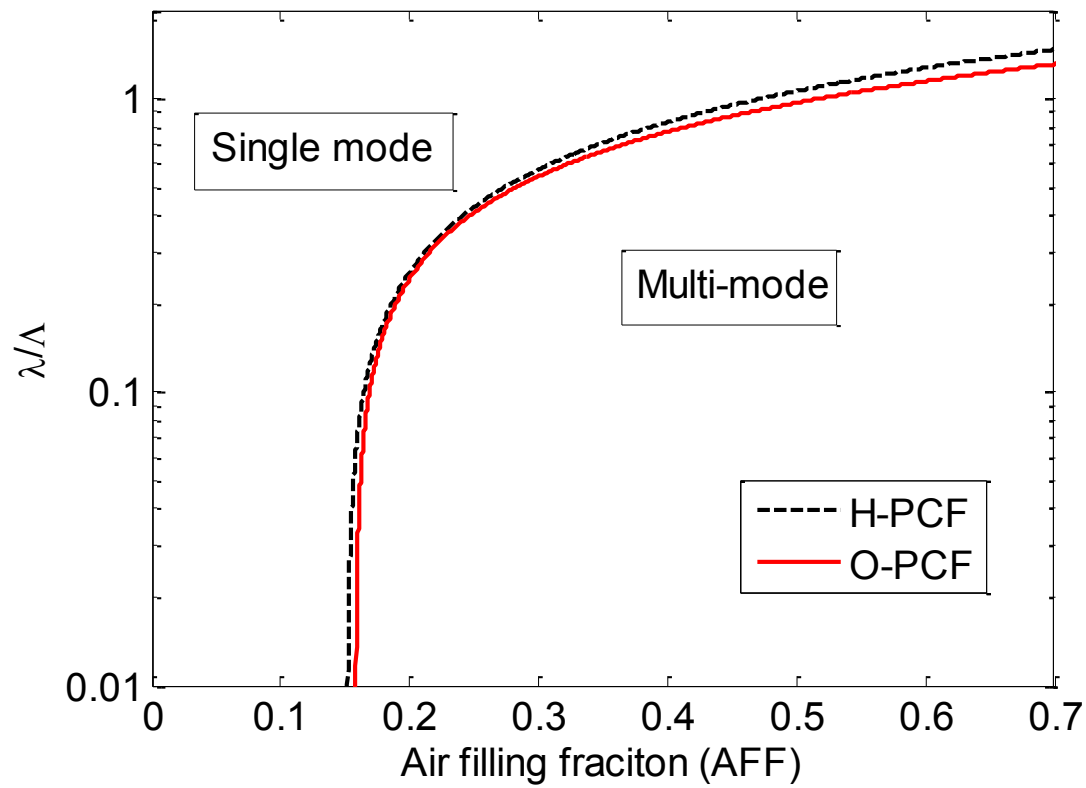
HE_{221}

TM_{02}

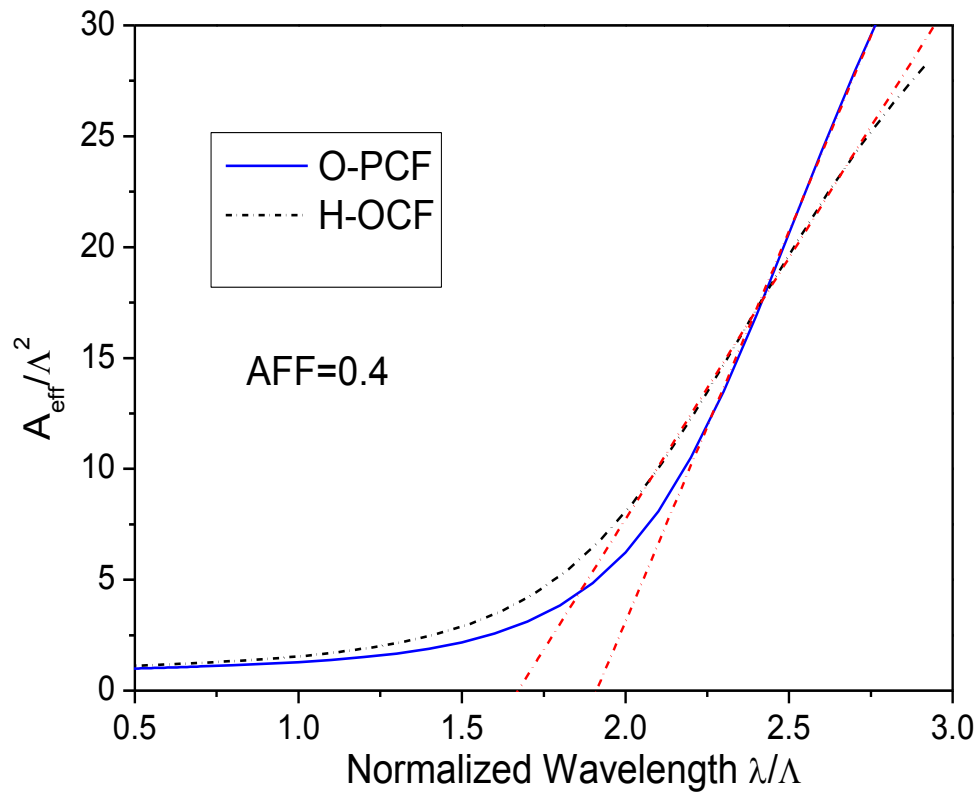
3—5阶模的总电场强度分布图



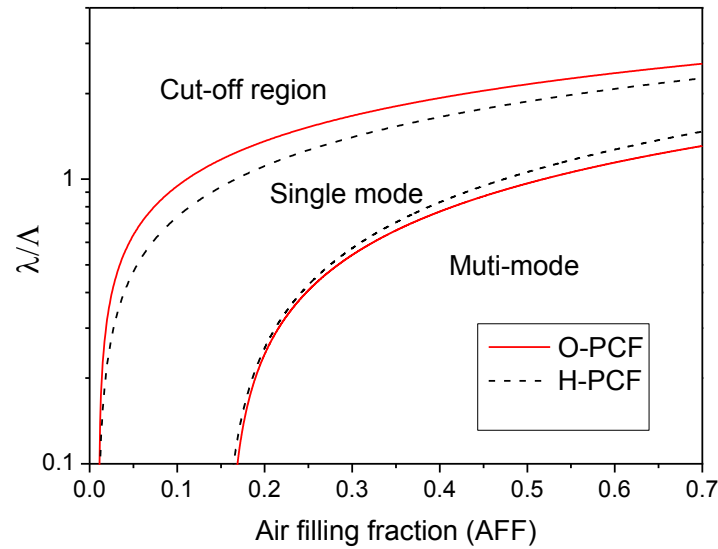
O-PCF与H-PCF二阶模有效面积随波长的变化关系



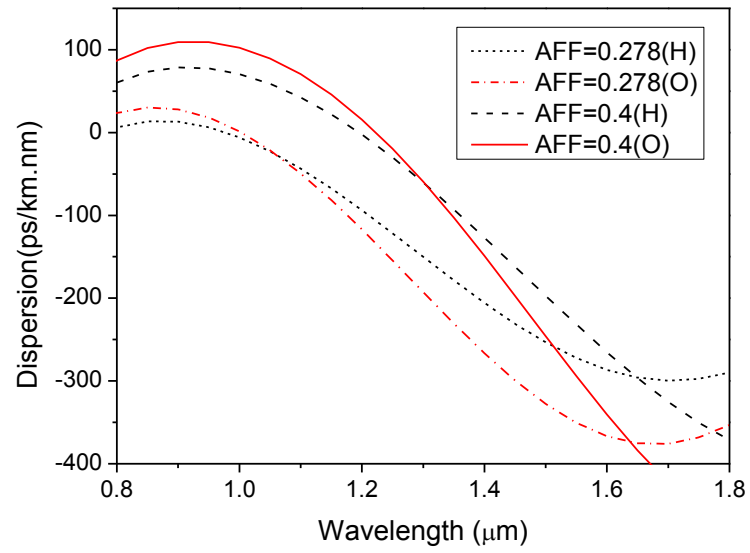
O-PCF和H-PCF基模和二阶模相位图



O-PCF与H-PCF基模有效面积随波长的变化关系

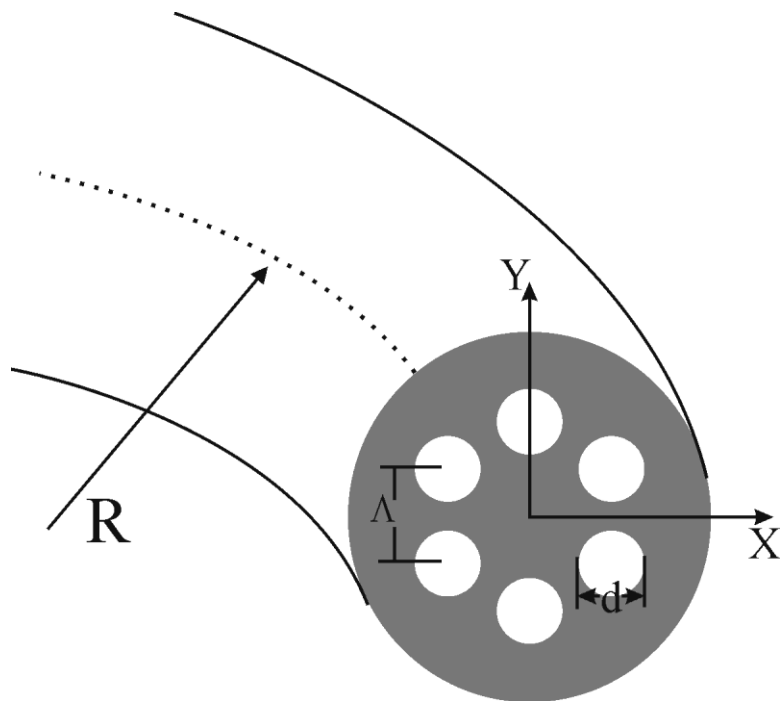


O-PCF和H-PCF非限制模，基模和二阶模相位图

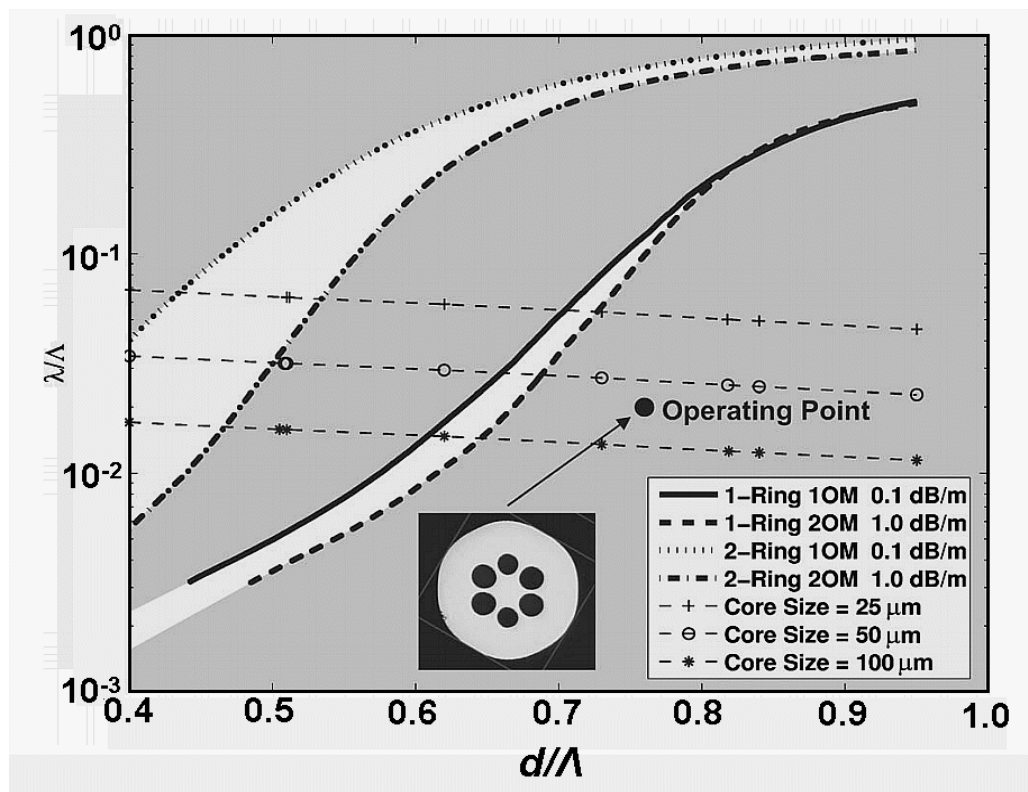


O-PCF和H-PCF色散系数随波长的变化关系

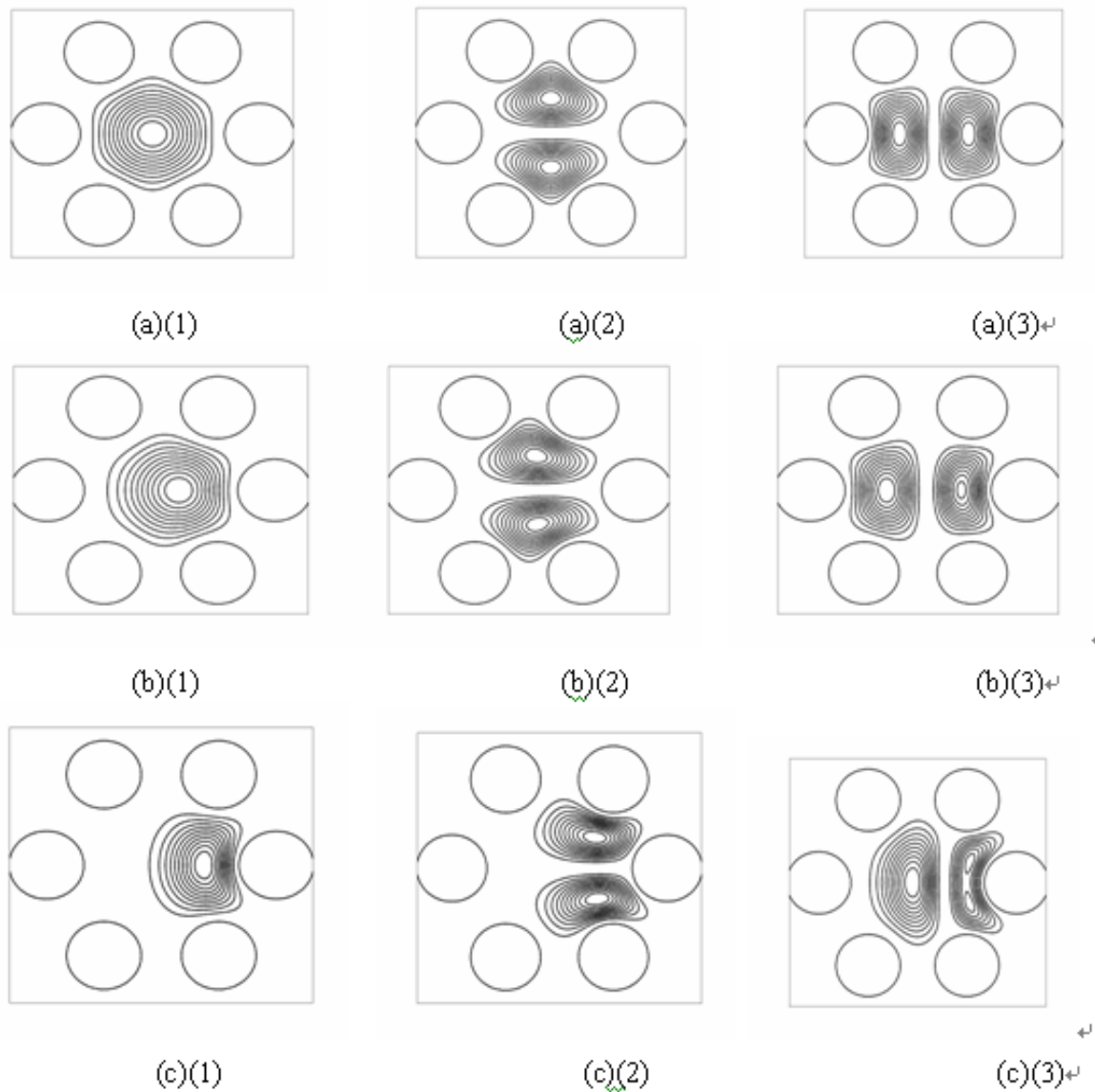
大模场光子晶体光纤弯曲特性的研究



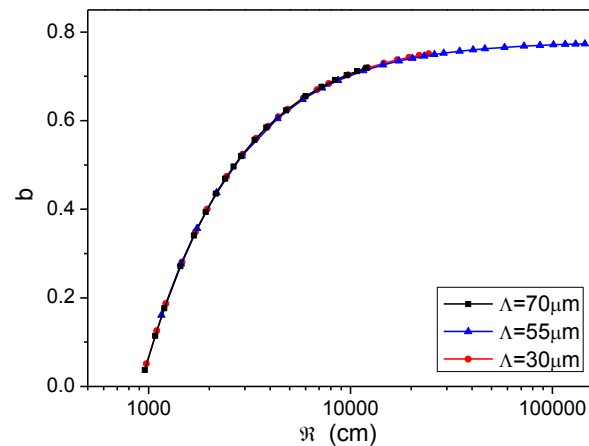
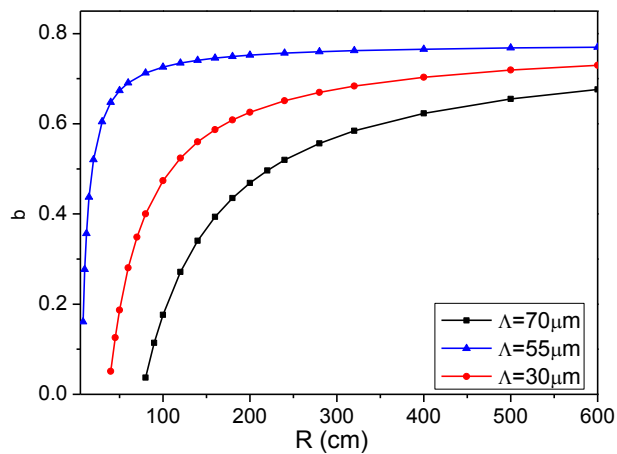
弯曲大模场光子晶体光纤结构示意图



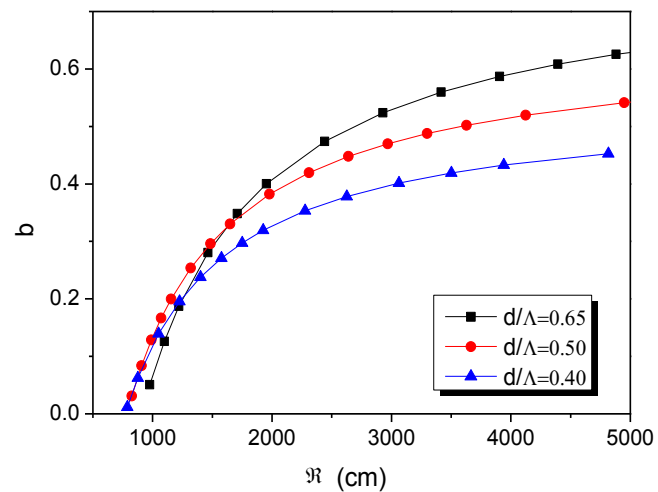
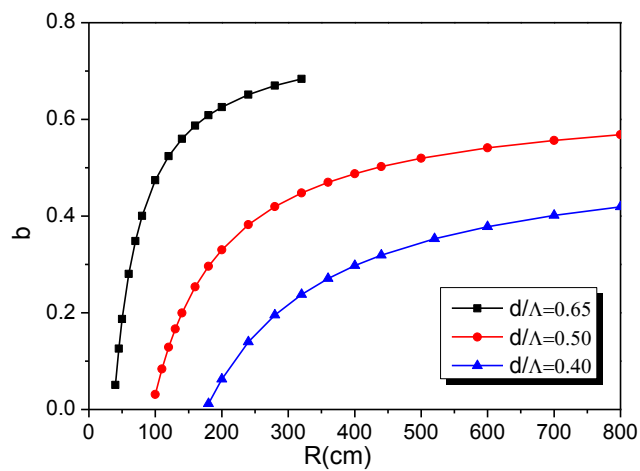
包层中具有一层空气孔和两层空气孔时PCFs的单模运转范围



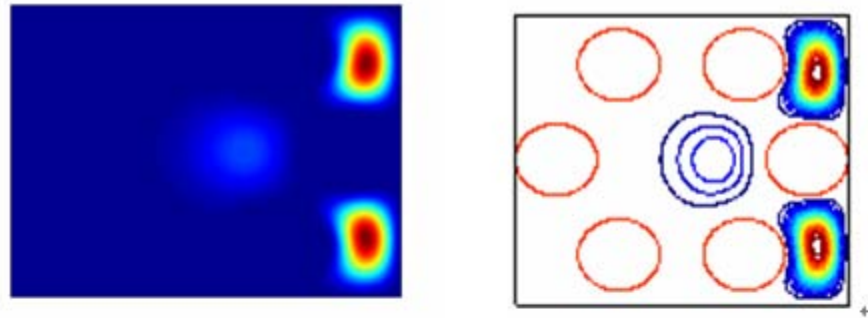
基模和二阶模的模场强度分布图 (a)直光子晶体光纤 (b)弯曲光子晶体光纤 $R=80\text{cm}$ (c) 弯曲光子晶体光纤 $R=20\text{cm}$, (1)LP01 (2) LP11o (3) LP11e 其中下标“o”、“e”分别表示奇模和偶模



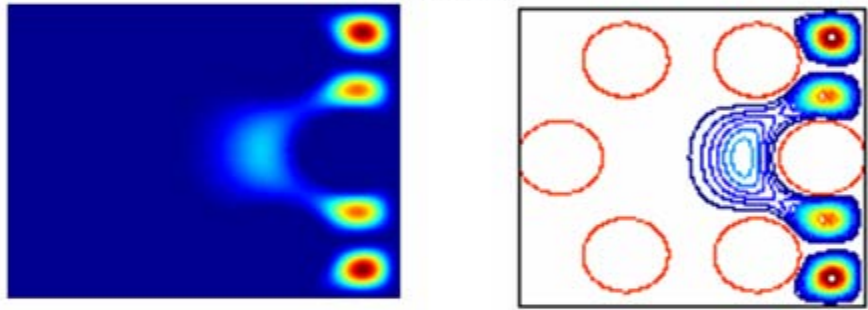
基模归一化传播常数 **b** 随弯曲半径和归一化弯曲半径的变化关系图($d/\Lambda=0.65$)



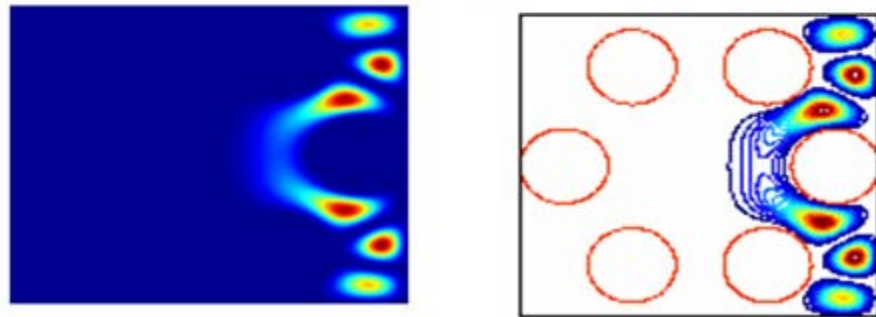
基模归一化传播常数**b**随弯曲半径和归一化弯曲半径的变化关系图($\Lambda=55\mu\text{m}$)



(a) $R=80\text{cm}^{-1}$

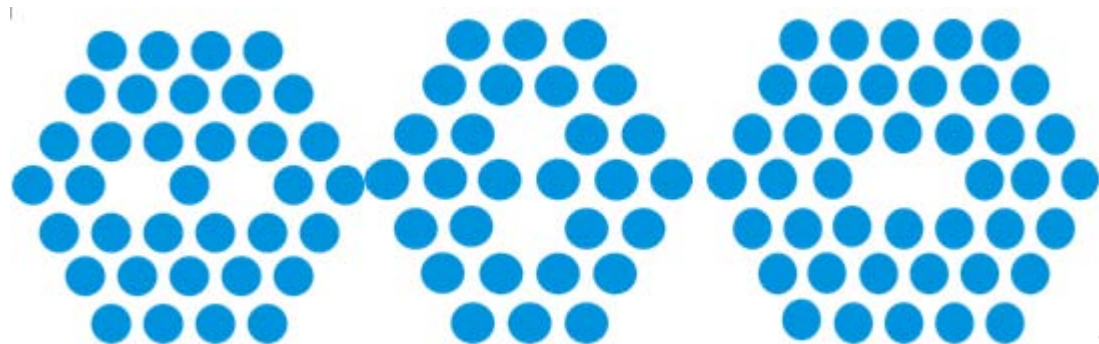


(b) $R=40\text{cm}^{-1}$

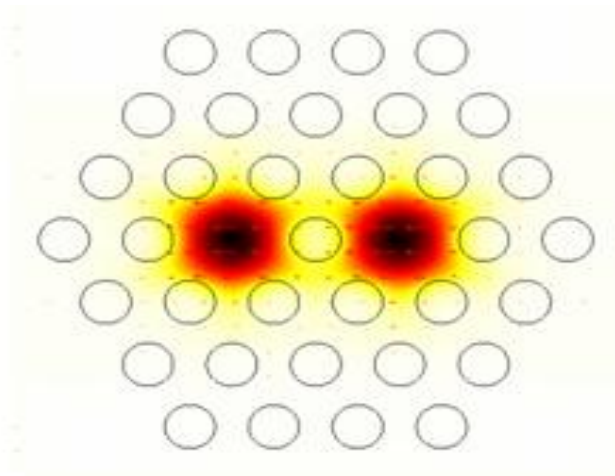


弯曲损耗振荡峰值处基模的分布图

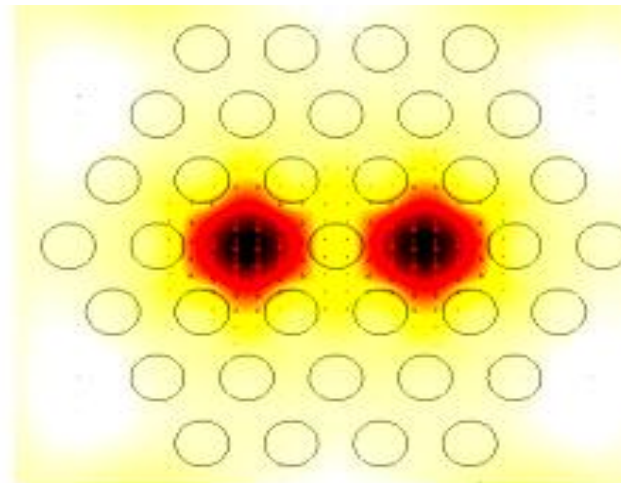
多芯光子晶体光纤耦合特性研究



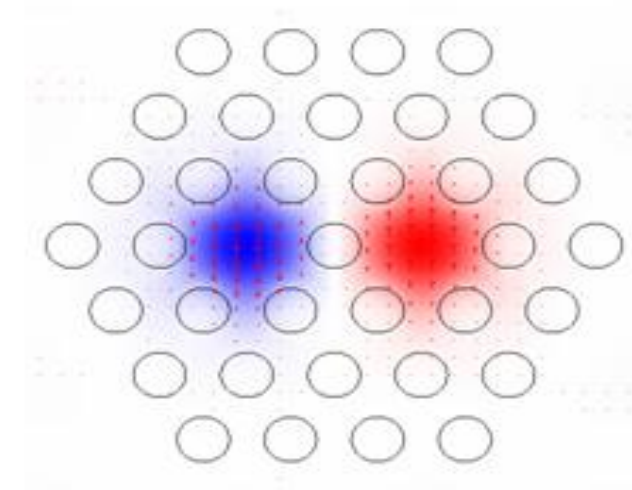
三种双芯PCFs结构示意图



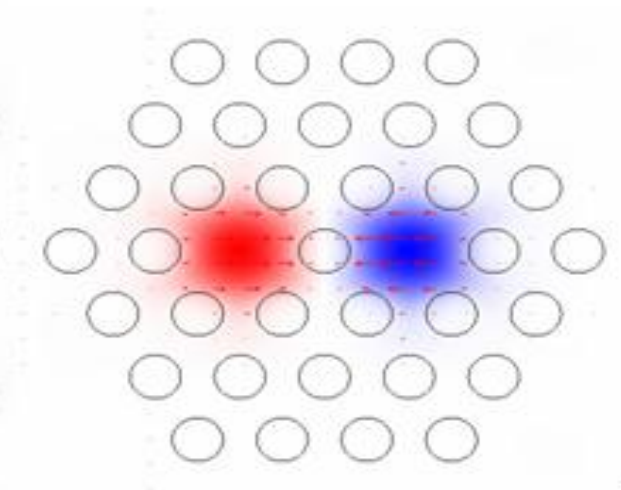
(a) $E_{xe}(x, y)$



(b) $E_{ye}(x, y)$

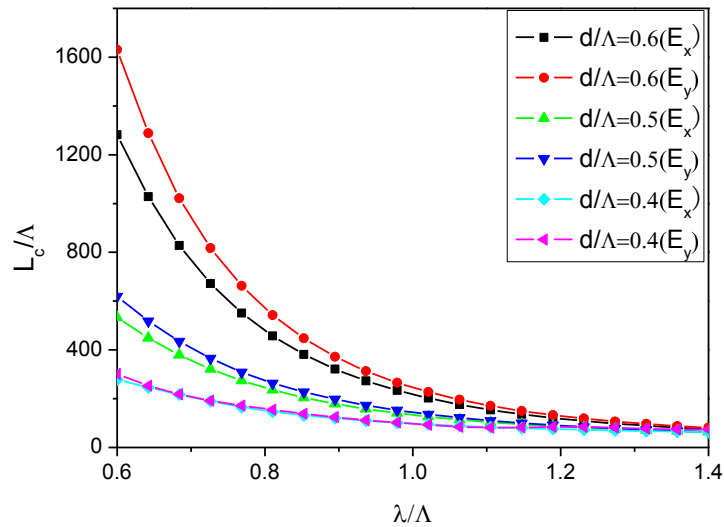


(c) $E_{xo}(x, y)$

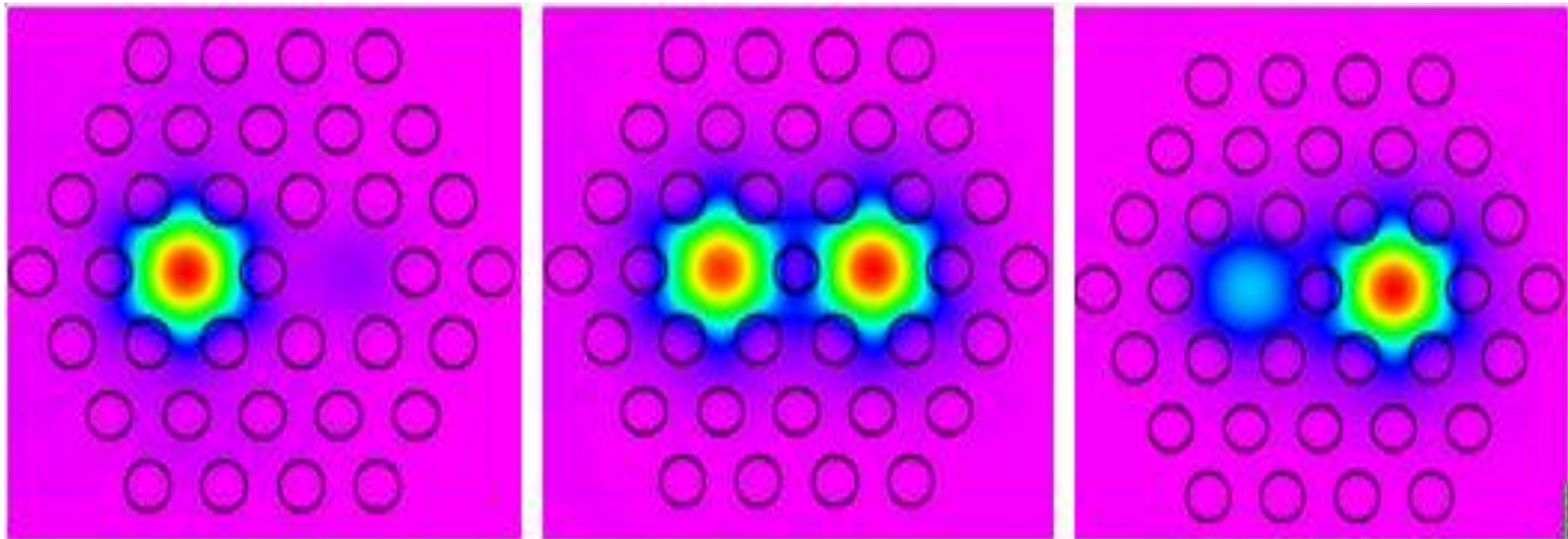


(d) $E_{yo}(x, y)$

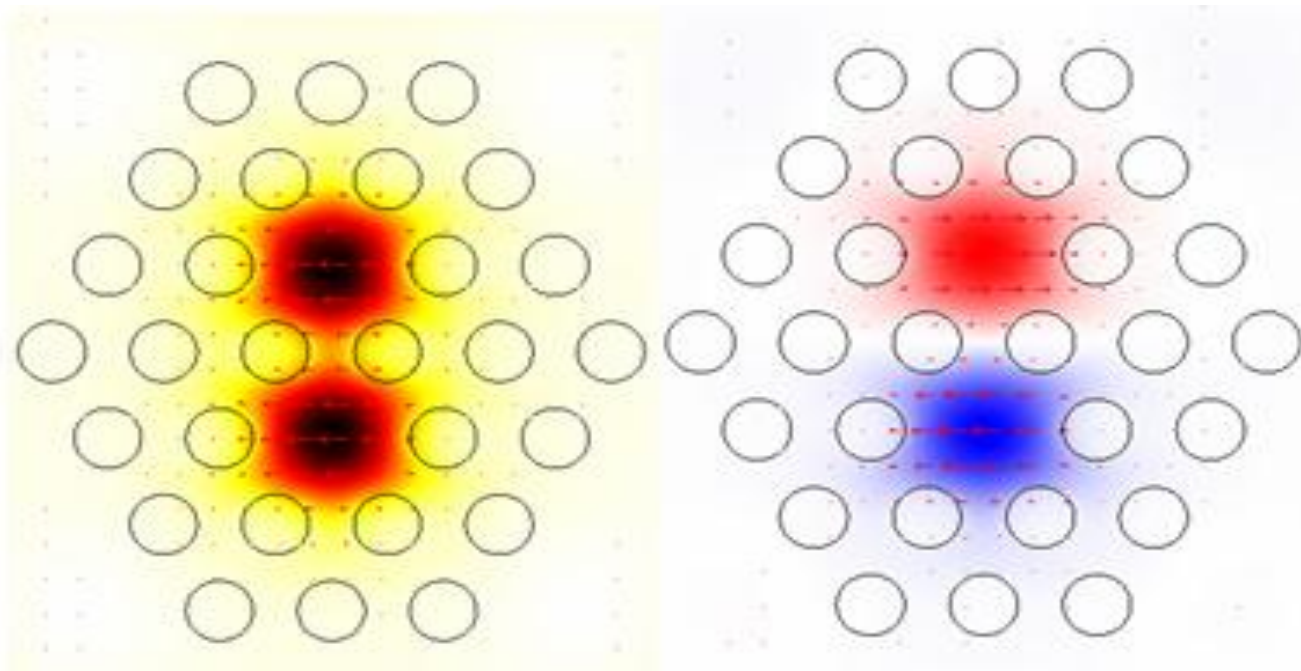
双芯PCF1前四个模式的电场分布图



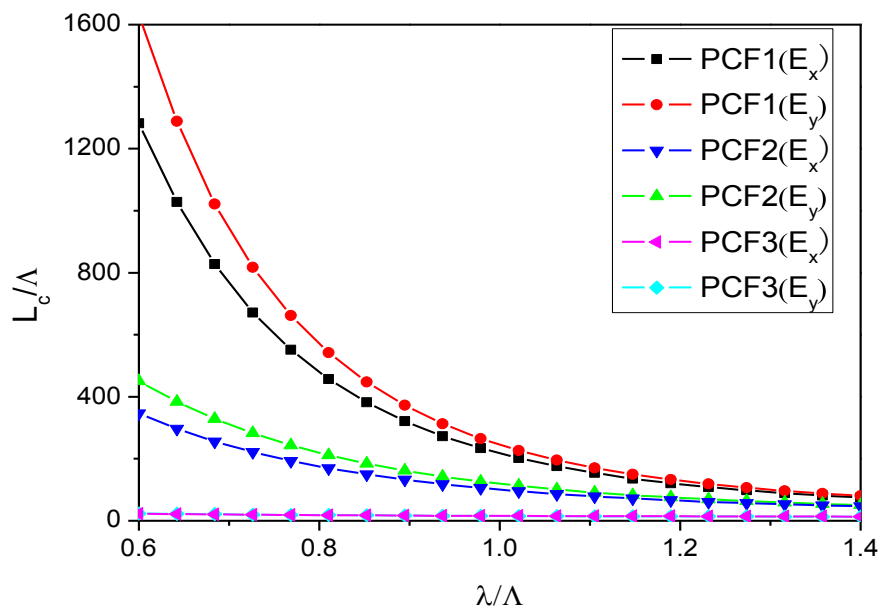
不同填充率时，双芯PCF1耦合长度随归一化波长的变化关系



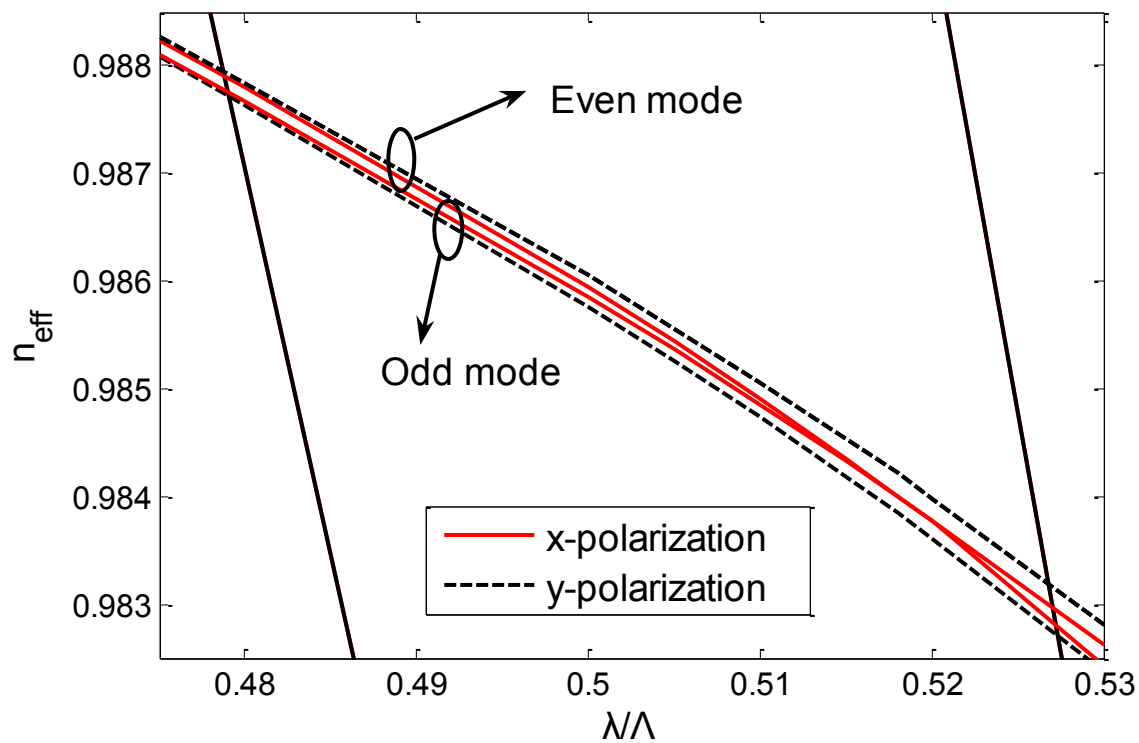
双芯PCF1在不同传输长度时的模场图



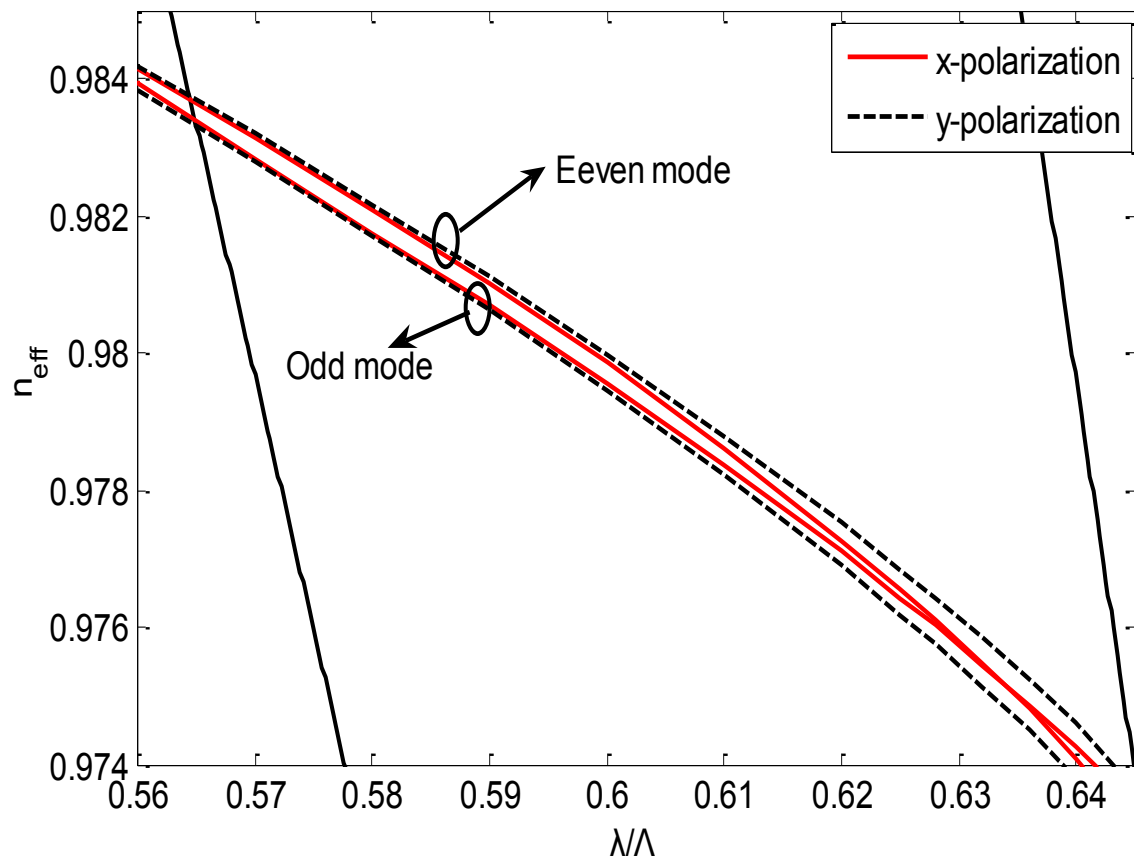
双芯PCF2 电场x分量的分布图



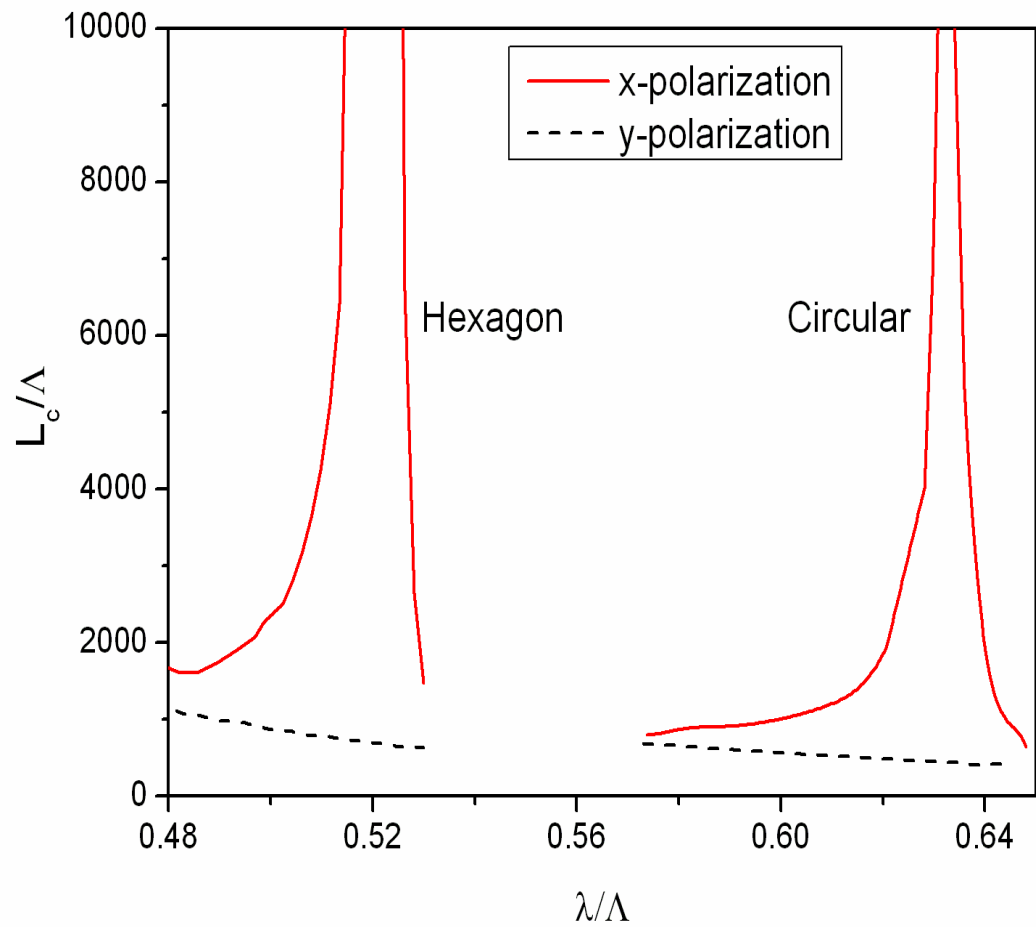
三种双芯PCF耦合长度随归一化波长的变化关系



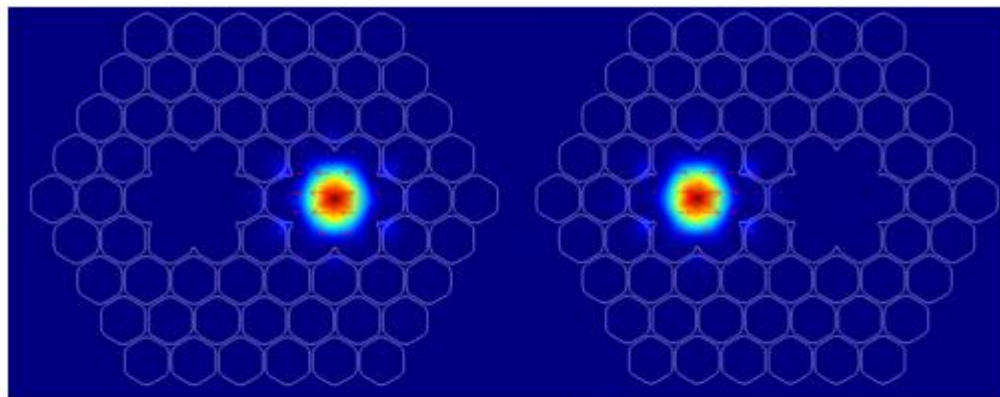
圆角六边形空气孔PBG模式有效折射率随波长的变化关系



圆形空气孔PBG模式有效折射率随波长的变化关系

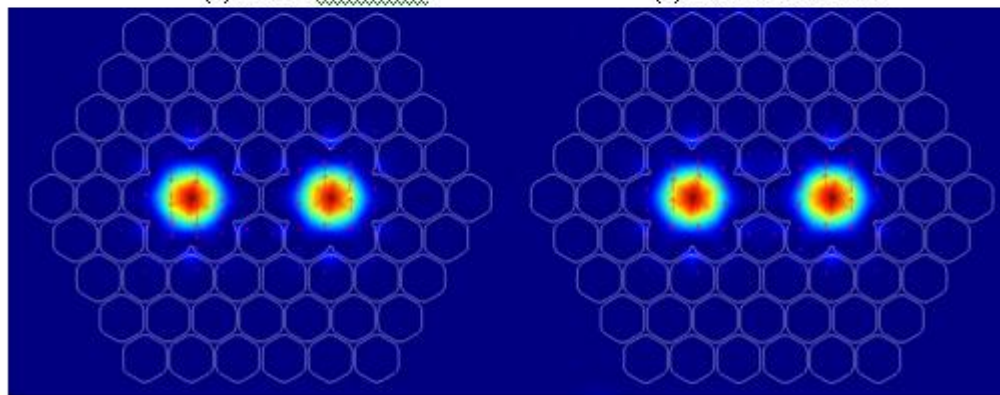


两种双芯PBGs耦合长度随波长的变化关系



(a) x 偏振方向奇模

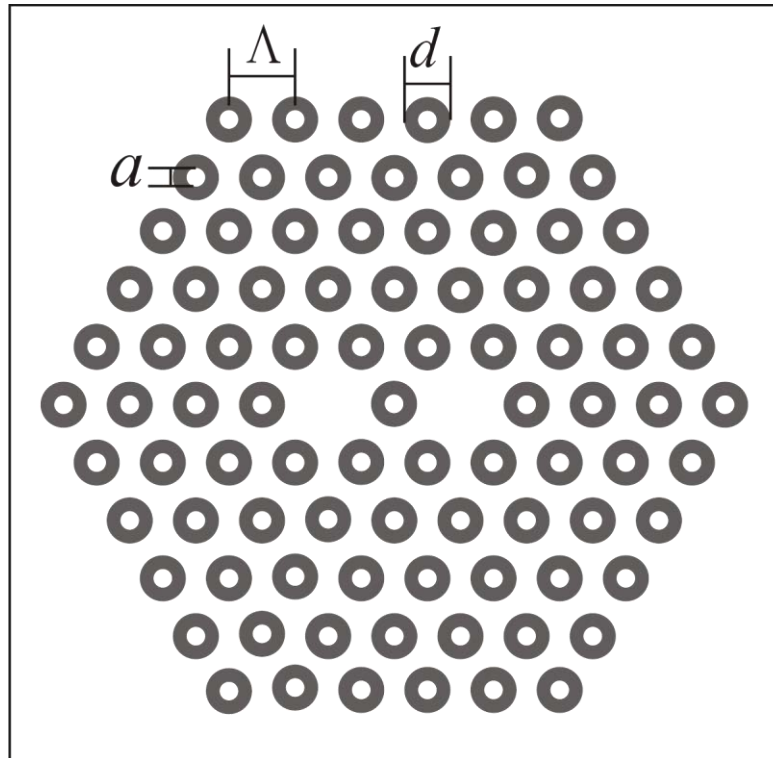
(b) x 偏振方向偶模



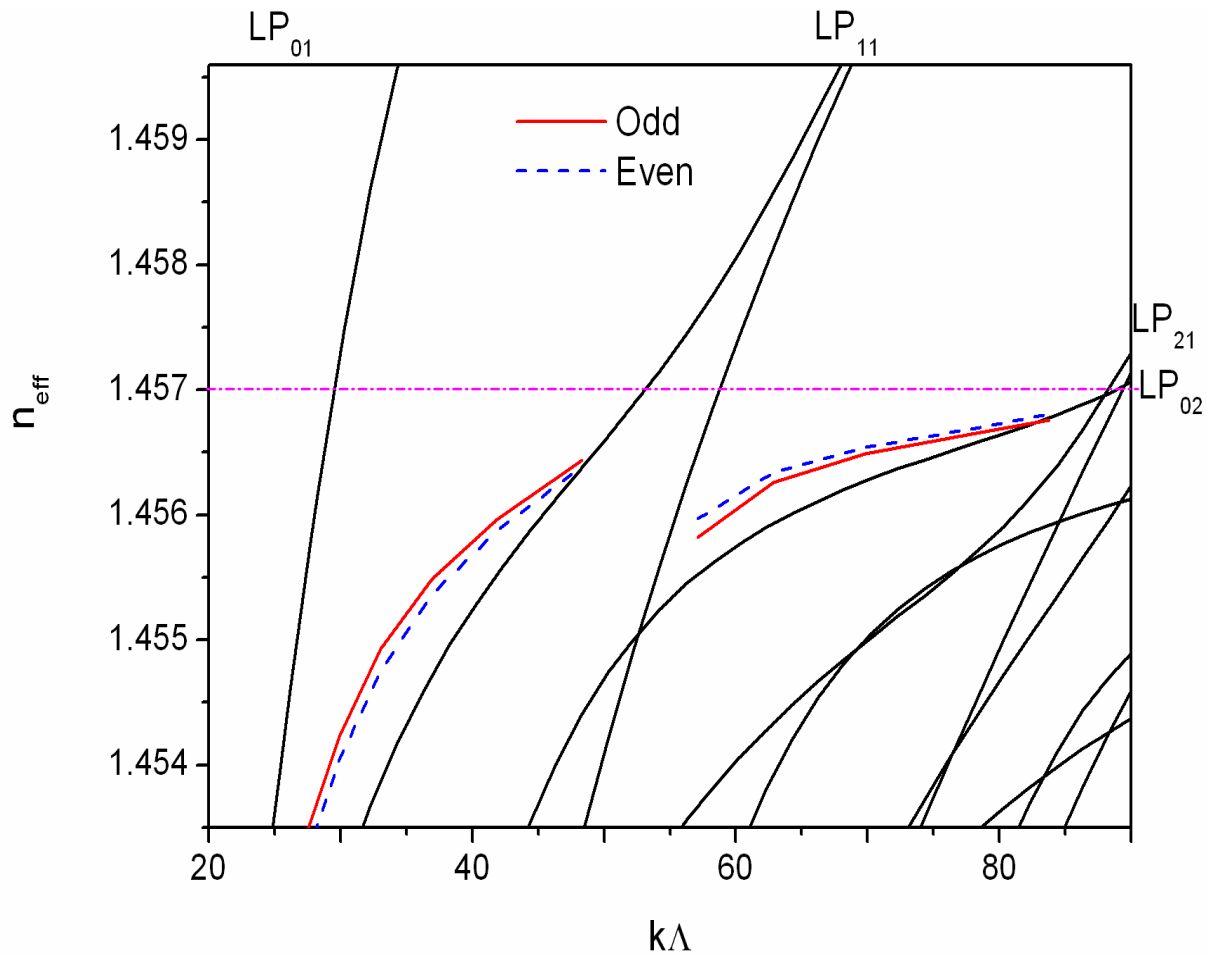
(c) y 偏振方向奇模

(d) y 偏振方向偶模

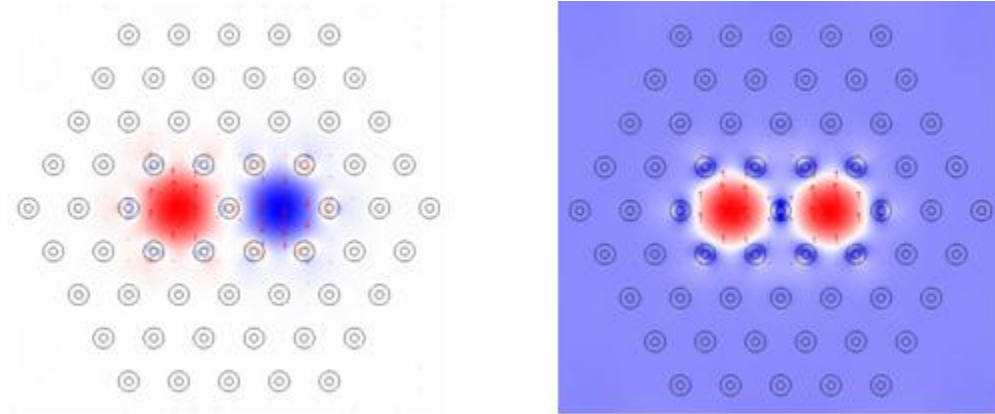
圆角六边形空气孔PBG无耦合点处的模式强度分布图



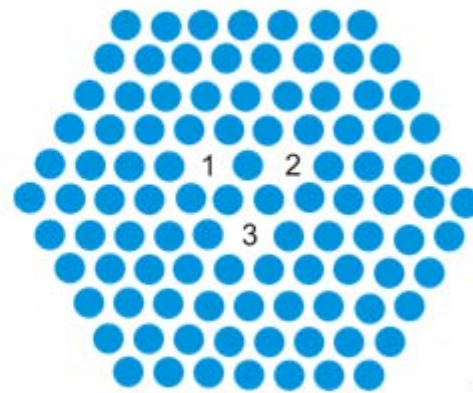
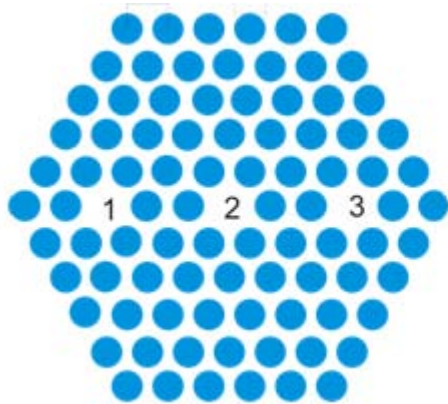
双芯全固态PBG横截面示意图



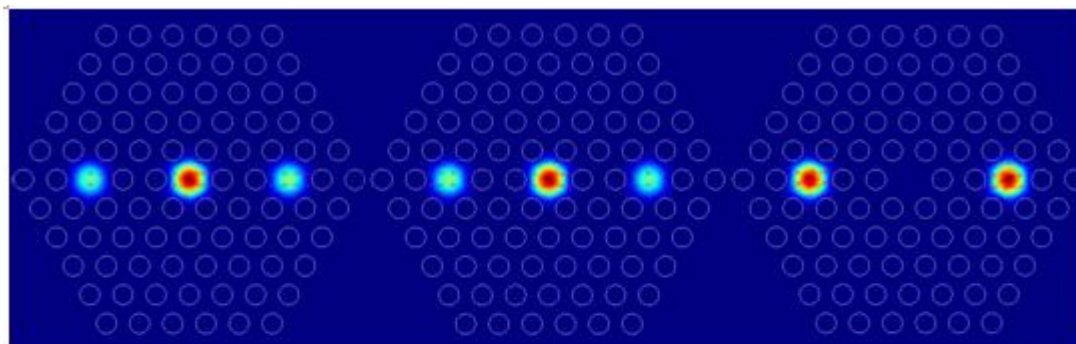
双芯全固态PBG y 偏振方向两个模式有效折射率随归一化频率的变化关系($a/d=0$)



y偏振方向模式的模式分布**(a)** 奇模**(b)**偶模



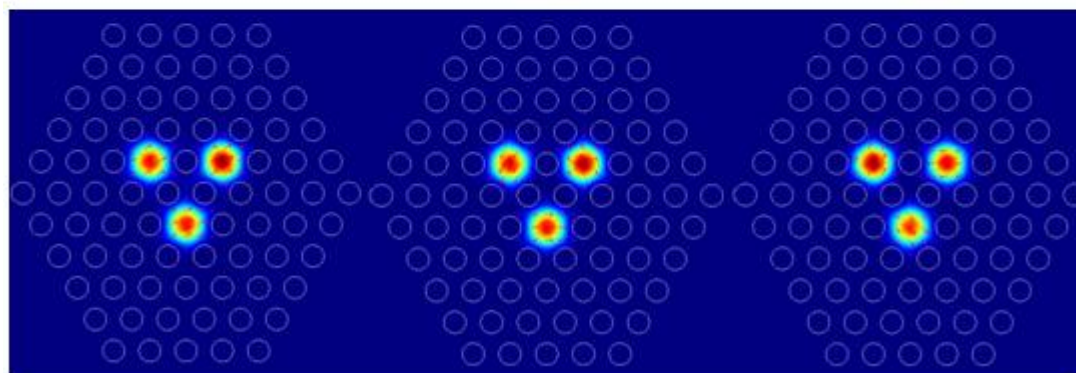
三芯PCFs的横截面结构示意图



(a)

(b)

(c)

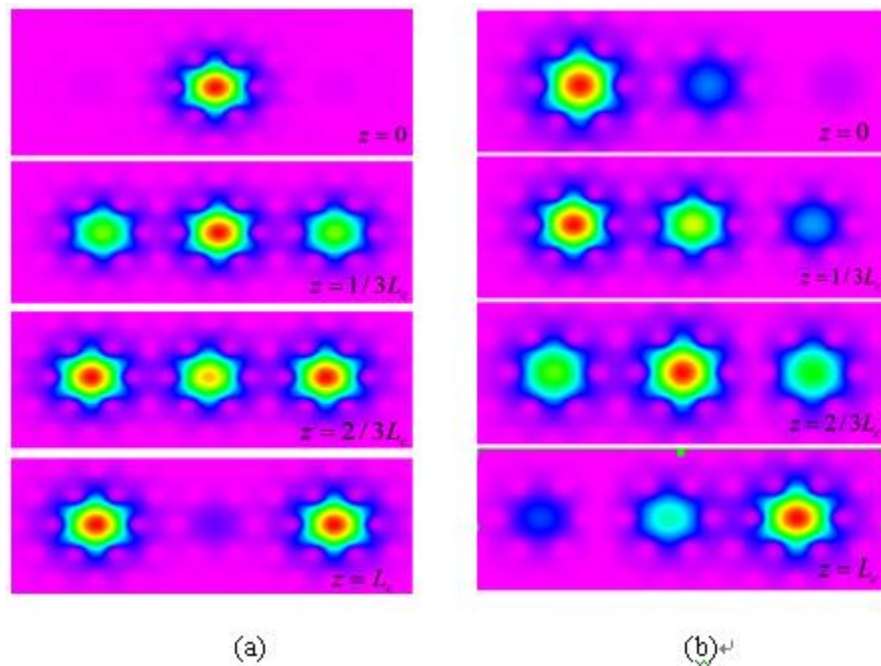


(e)

(f)

(g)

三芯PCFs x偏振方向的模式分布图



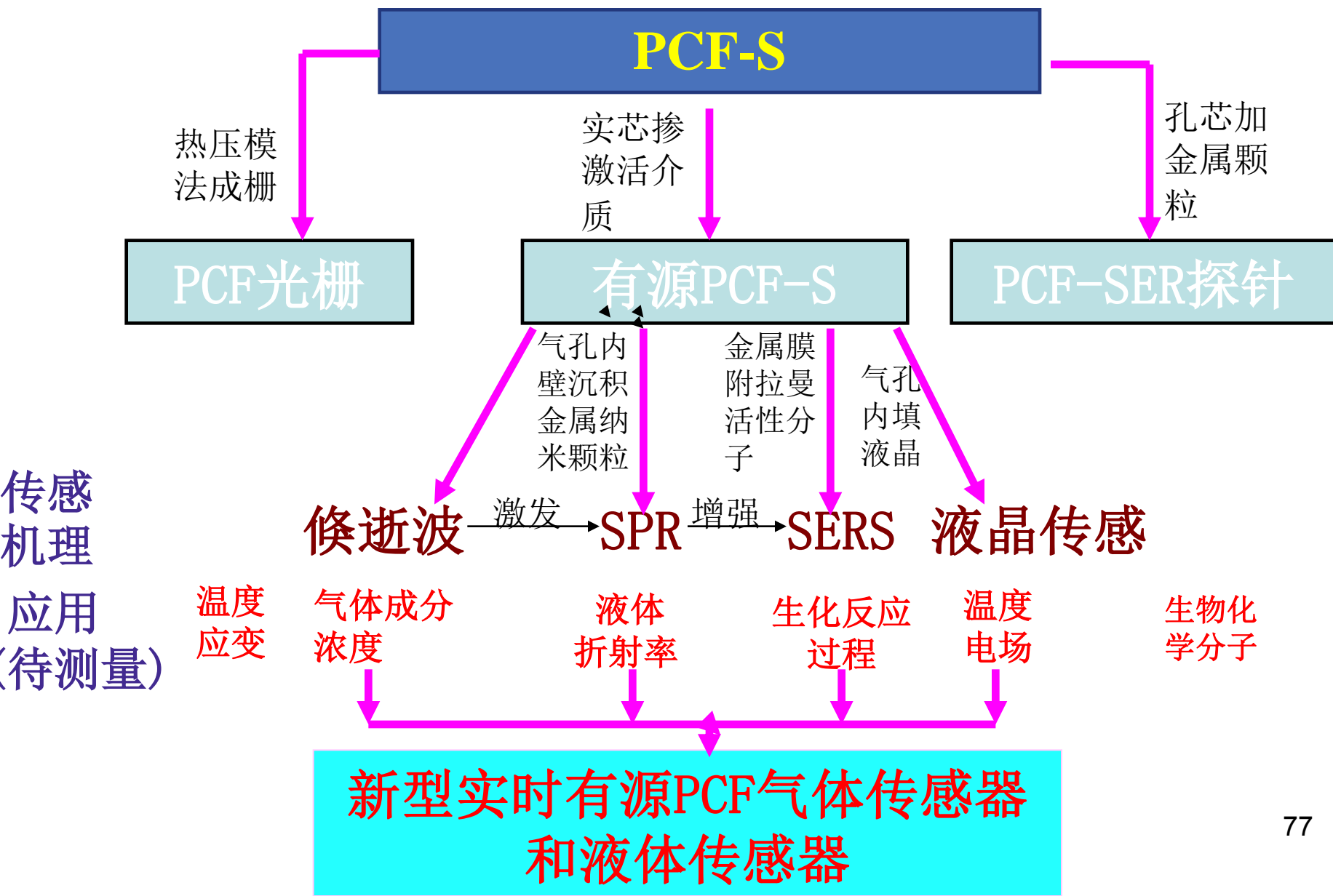
不同传输距离时的模场分布图(a)从纤芯2入射(b)从纤芯1入射

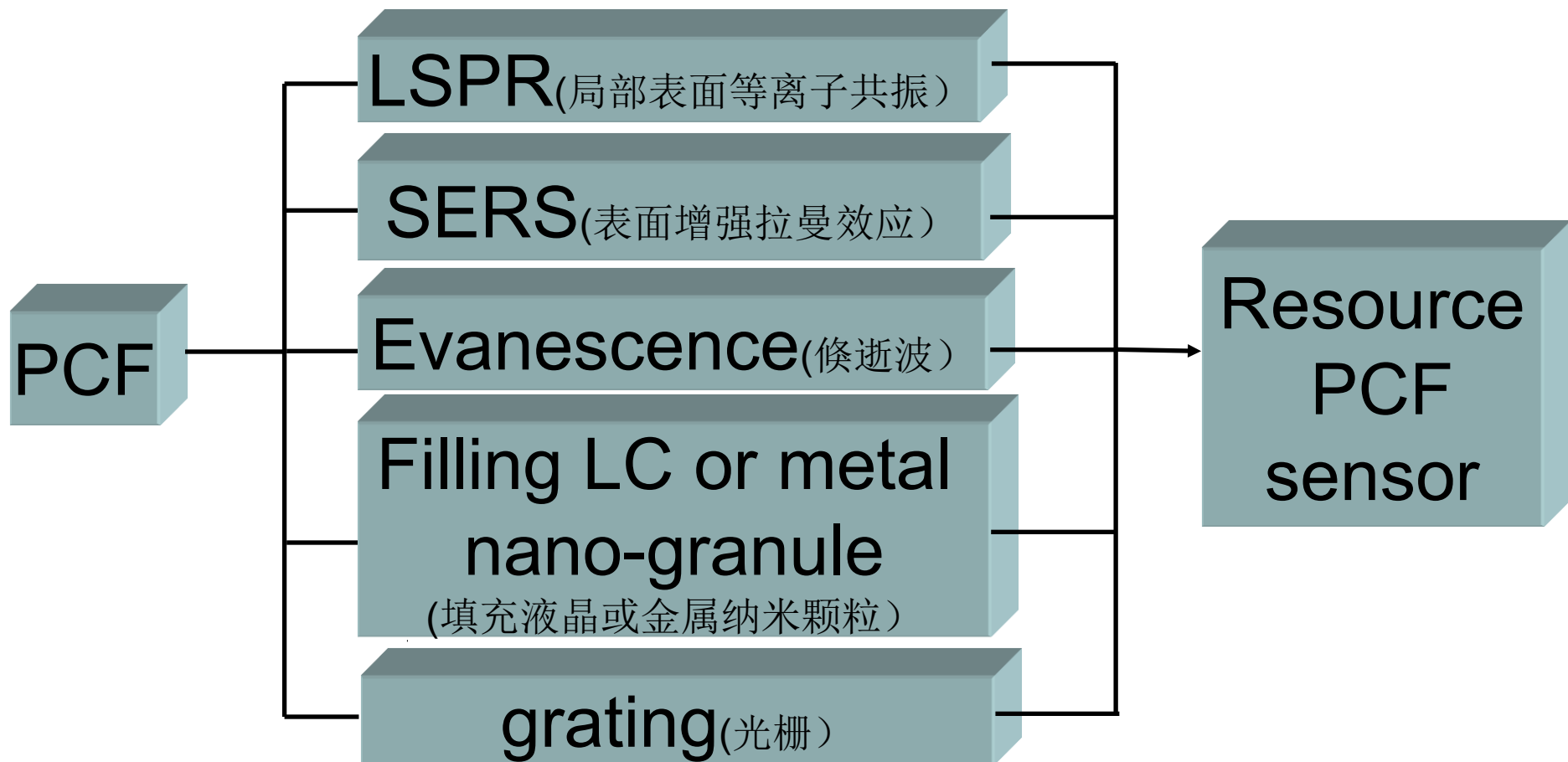
新型光子晶体光纤 传感器的基础研究

研究意义

- 光纤传感器具有抗电磁干扰，实时无损检测、易于组成光纤传感网路等优点，在国家安全、生物医药等多个领域具有重大的社会需求和应用前景；
- 新型光纤—光子晶体光纤（PCF）其空气孔微结构可以进行灵活设计，为传感器设计提供了新的方法，并且PCF能克服普通光纤传感器固有的缺点（耦合损耗较大、保偏特性差和存在交叉敏感问题），还具有多维结构、调谐范围宽、模场面积大等优良特性，因此是目前传感器研究领域的一大热点。

主要研究内容框图





主要研究内容

- 有源光子晶体光纤传感器研究。探索在光子晶体光纤纤芯中掺杂激活介质并以LD作为泵浦源，将光源与传感器及其传输介质集成，实现有源光子晶体光纤传感；
- 基于倏逝波的光子晶体光纤传感器研究。研究在实芯光子晶体光纤 (SCPCF) 包层气孔中注入气体的倏逝波传感机理，探讨SCPCF在探测危险气体方面的应用前景；

主要研究内容

- 基于局部表面等离子体共振 (LSPR) 效应和表面增强拉曼效应 (SERS) 的光子晶体光纤传感器研究。研究在气孔壁上沉积金属纳米颗粒后倏逝波激发的表面等离子体共振 (LSPR) 效应的传感机理，设计等离子技术与PCF技术相结合的液体传感器；分析纳米材料的表面增强拉曼散射效应的传感机理，研究基于表面增强拉曼效应 (SERS) 的纳米光子晶体光纤传感器，设计具有SERS活性的光子晶体光纤探针；

主要研究内容

- 基于液晶填充的光子晶体光纤传感器研究。研究填充液晶材料光子晶体光纤传感器的传感机理，分析液晶分子取向及其光子晶体带隙可调原理，研究不同的液晶材料及其不同分子排列光子晶体光纤传感器的传感机理，以及液晶光子晶体光纤空气孔排列对光子晶体传感性能的影响；
- 建立热压模法成栅理论模型，建立热压模法成栅理论，分析热压模法成栅机理以及所成光栅的特性，完成热压模法PCFG制备装置的设计制作。在此基础上，探索新型光子晶体光纤光栅传感特性及其应用。

- 研究基于倏逝波的光子晶体光纤气体传感器；
- 研究将金属纳米颗粒充入光子晶体光纤空气孔后的基于局部表面等离子体共振 (LSPR) 效应的传感机理；
- 研究基于表面增强拉曼散射效应 (SERS) 的光子晶体光纤传感机理；
- 进行有源光子晶体光纤传感机理研究；
- 建立热压模法光子晶体光纤光栅制备理论。

基于倏逝波的光子晶体光纤传感机理研究

- 光在光纤中以全反射传播时，仍能产生部分穿透界面的波，此波振幅随着与界面距离的增大而指数衰减，因此只存在于界面附近一薄层内，称为倏逝波。
- 利用倏逝波传感是将实芯PCF包层气孔中充入气体（或液体），气孔中的倏逝波与被测气体相互作用后光强发生变化，这种变化对充入的气体的种类和浓度敏感，根据光谱吸收原理即可进行气体检测。

应用研究：危险气体的探测

- 矿井中的常见危险气体有 CH_4 ， CO ， H_2S 等，如其浓度过高会发生人员中毒或爆炸等危险；
- 如果有稳定、可靠、灵敏度高的危险气体传感探测系统，能够对这些气体进行实时，高灵敏度检测将能挽救很多生命。



基于倏逝波的光子晶体光纤传感器研究

- 研究PCF的倏逝波传感特性。建立SCPCF数值模拟平台，分析微结构参数和传输波长对模场分布的影响，数值计算不同结构的气体传感器的相对灵敏度；

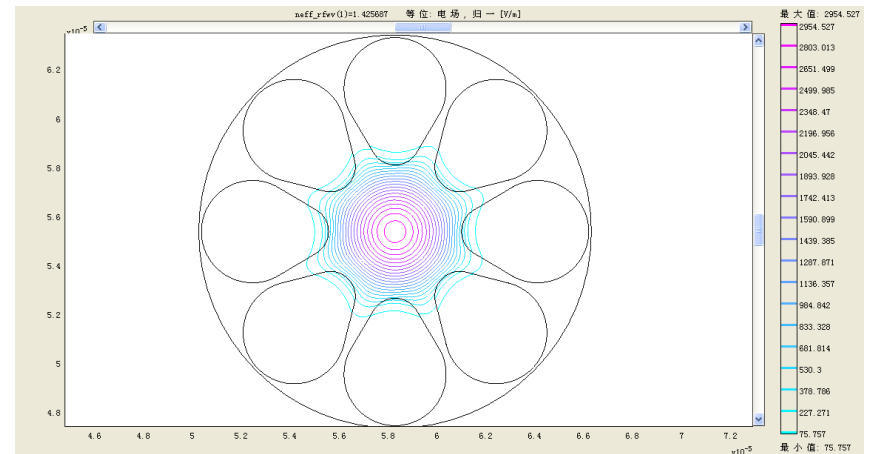
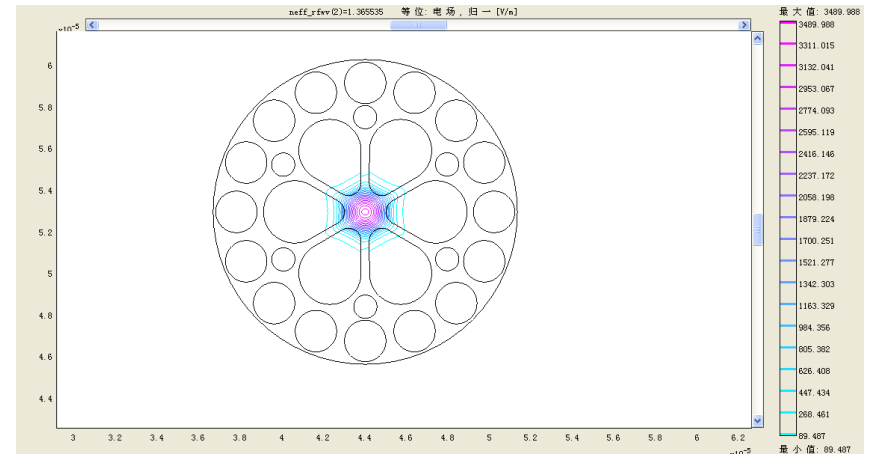
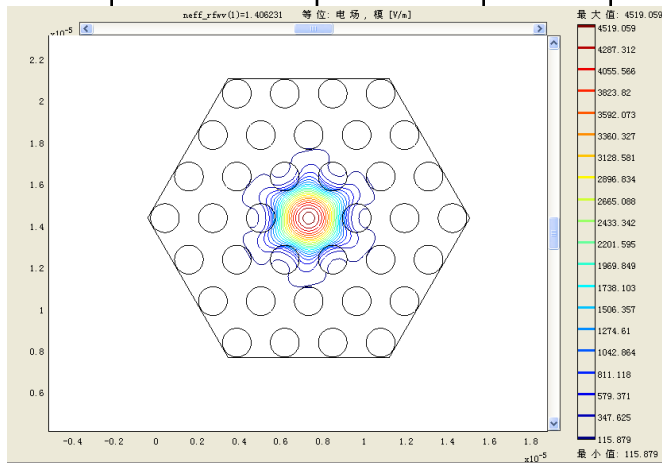
$$r = (n_r/n_e) f$$

$$f = \int_{holes} (E_x H_y - E_y H_x) dx dy / \int_{total} (E_x H_y - E_y H_x) dx dy$$

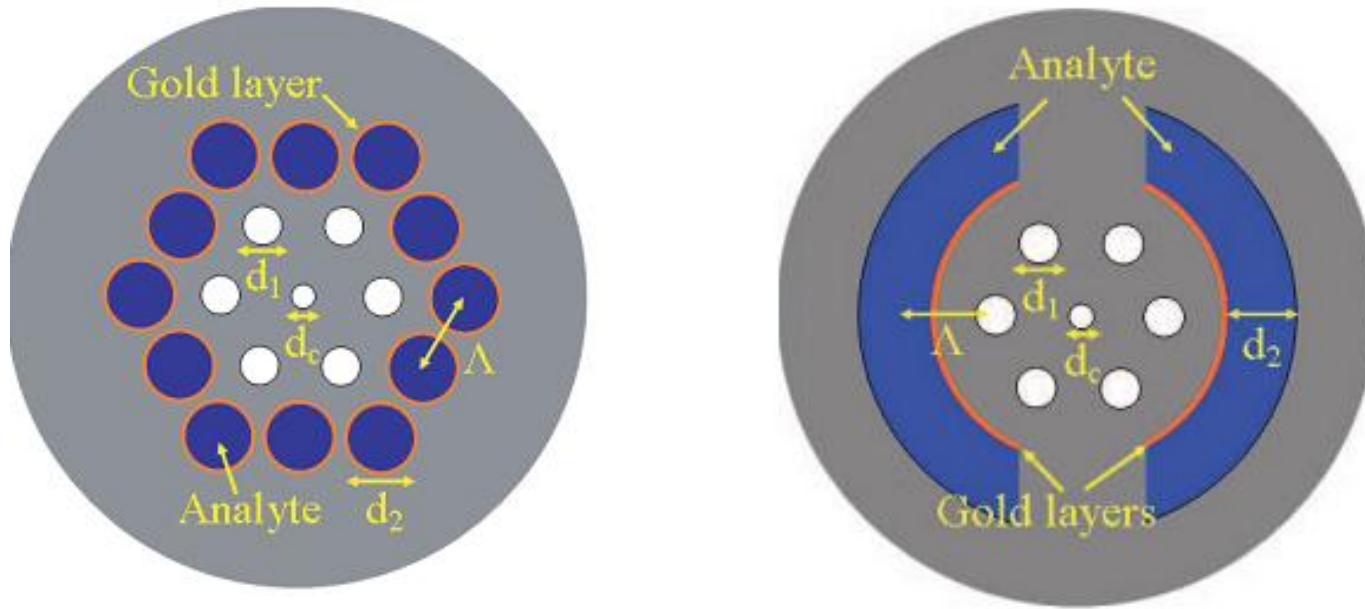
- 搭建光泵浦PCF的实验装置。初步利用实芯光子晶体光纤的倏逝波针对甲烷和一氧化碳气体进行传感检测实验；

已做工作:几种危险气体在吸收峰处的相对灵敏度

GAS	λ (μm)	f(%)
CH ₄	1.65	4.47
		1.39
		0.3
C ₂ H ₂	1.53	3.85
		1.07
		0.24
CO	1.57	3.84
		1.2
		0.28



优点:可在气孔内壁
镀金属膜;易于相位
匹配

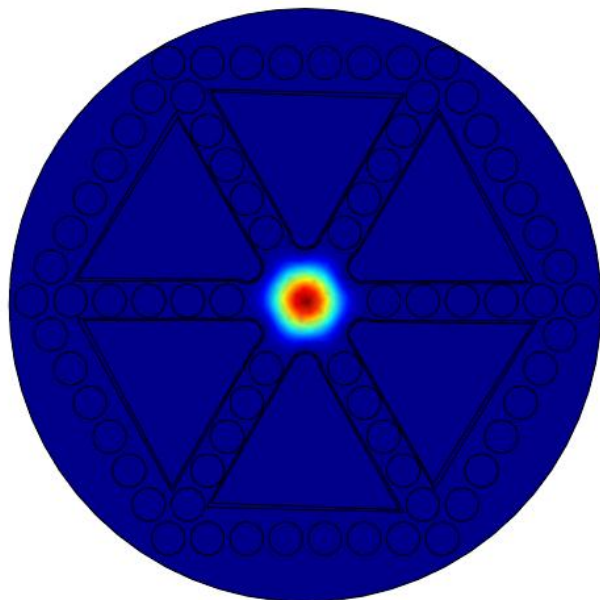


光子晶体光纤SPR传感器

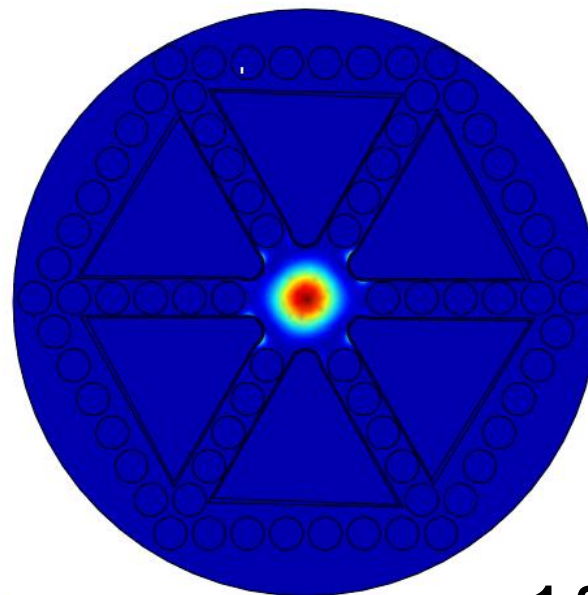
基于 LSPR效应的PCF传感机理研究

- 研究金属纳米颗粒的LSPR现象。分析纳米材料和颗粒以及待测物折射率对局部表面等离子体共振吸收峰的影响。
- 研究在PCF气孔壁上沉积金属纳米颗粒后倏逝波激发的表面等离子体共振(LSPR)效应和传感特性。建立传感理论模型和数值模拟平台，分析PCF结构参数、金属膜厚度和介质折射率对金属表面等离子体波与纤芯传导模相位匹配、PCF的模场分布和透射光谱的影响。

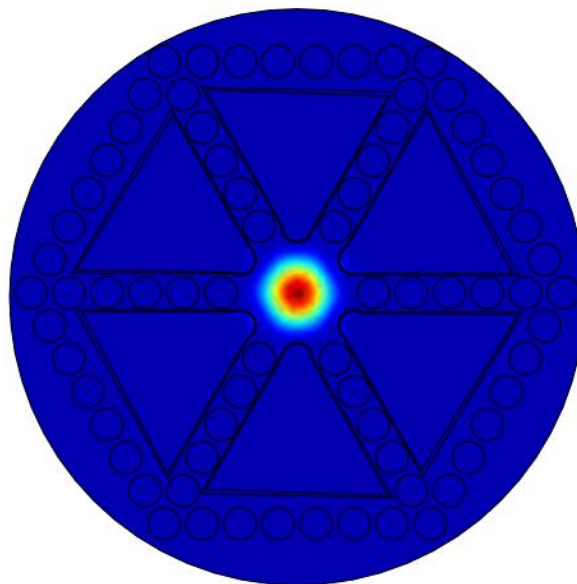
已做工作:镀金膜的PCF的模场分布数值模拟



1.33
0.6 μm



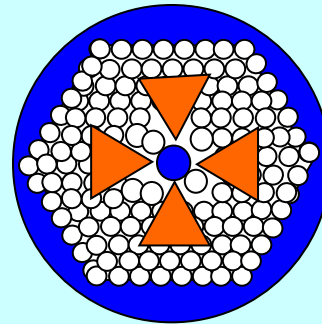
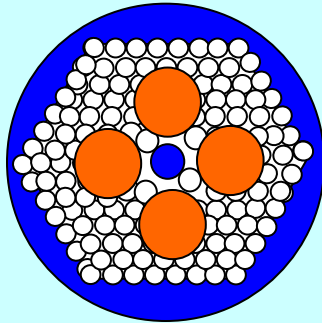
1.33
0.535 μm



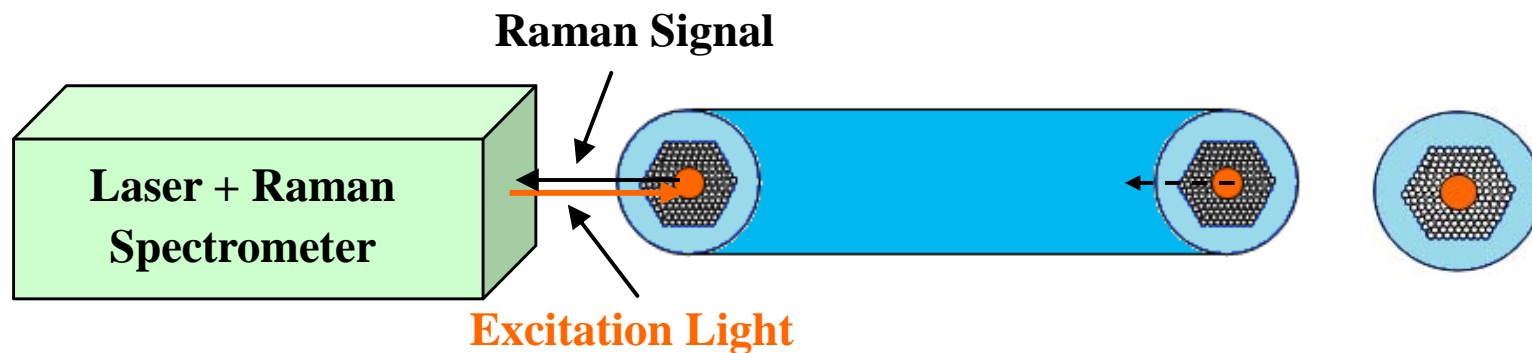
1.4
0.583 μm

基于倏逝波的PCF传感器优化设计

- 在第一年工作基础上，设计不同微结构包层和微结构纤芯的实芯大气孔PCF，分析倏逝波气体传感灵敏度，获得高传感灵敏度和短扩散时间的气体传感器，并进行实验验证；



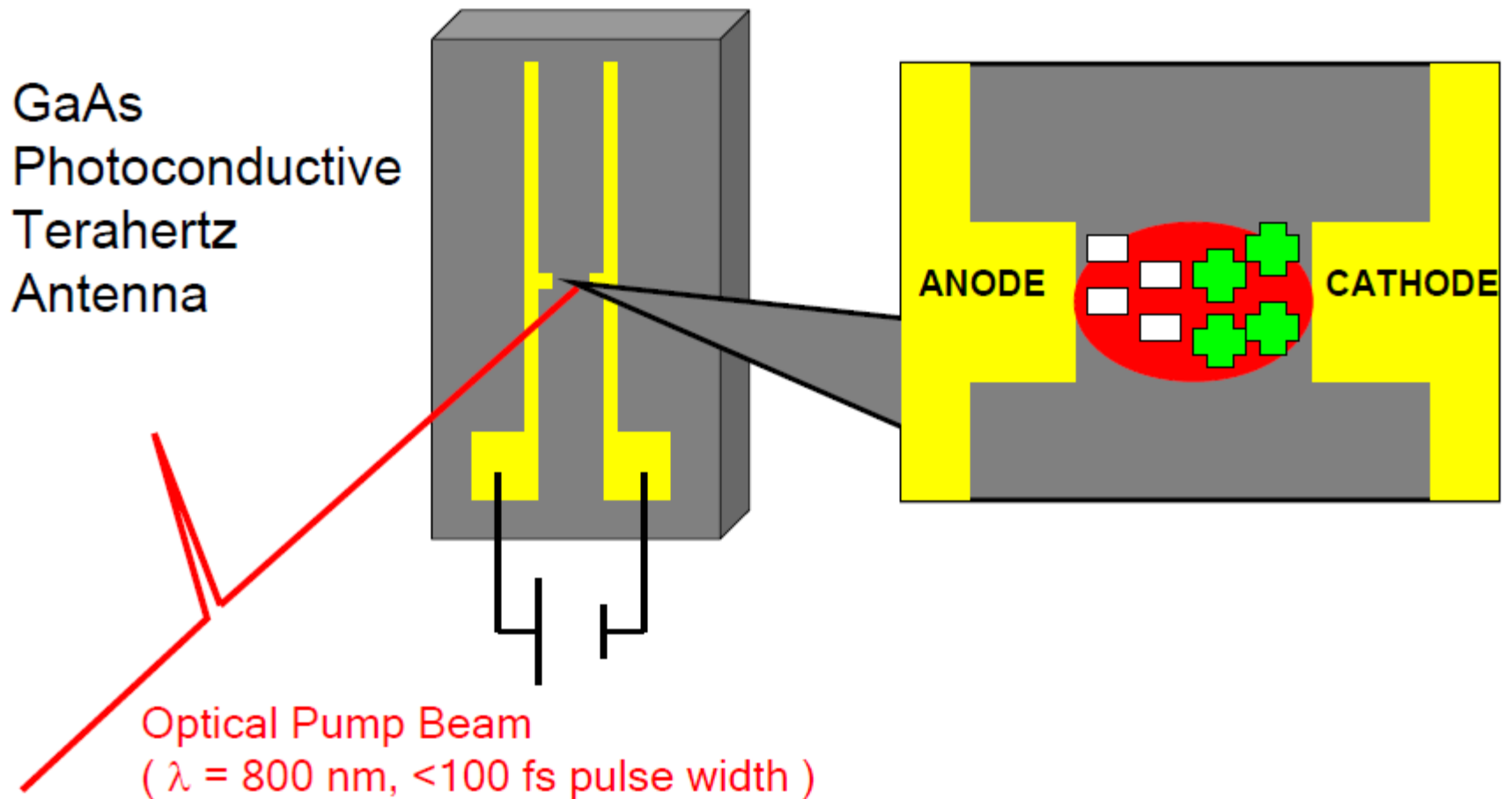
基于 SERS 的光子晶体光纤传感器



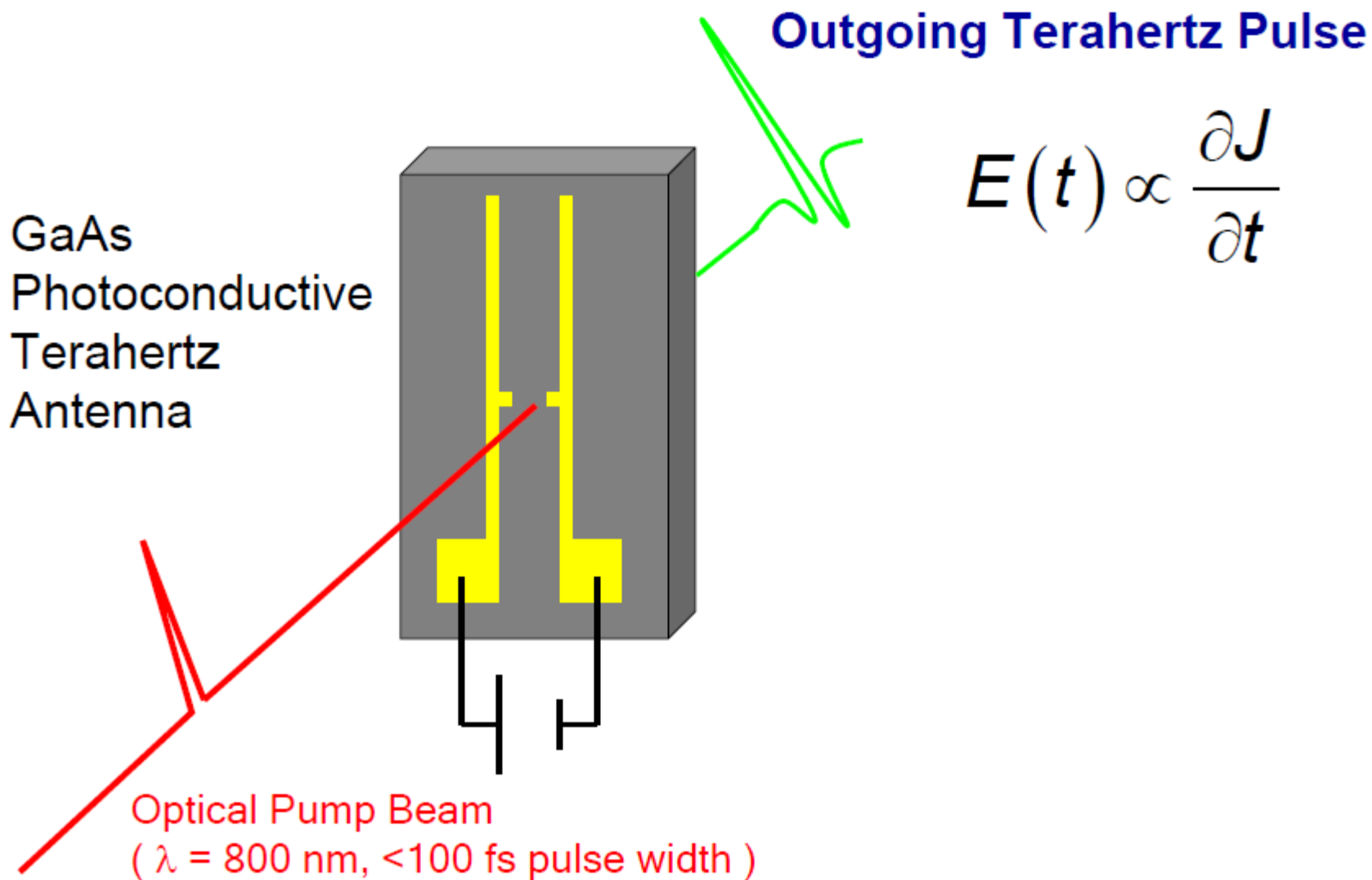
Hollow core filled with SERS substrate and analyte

- 研究不同尺寸不同形状的纳米颗粒对基于表面增强拉曼效应 (SERS) 的空芯光子晶体光纤传感性能的影响

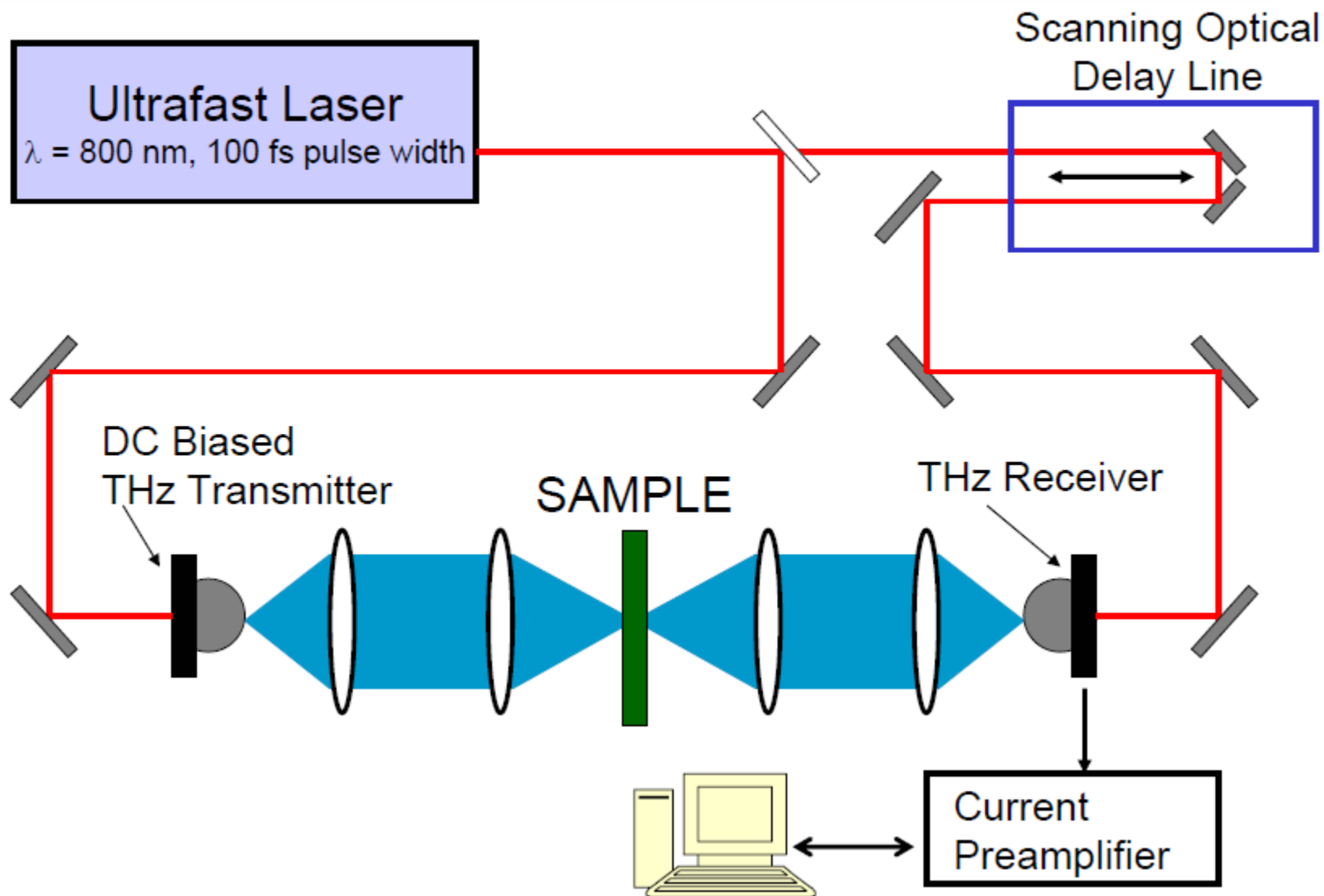
Photoconductive THz antenna



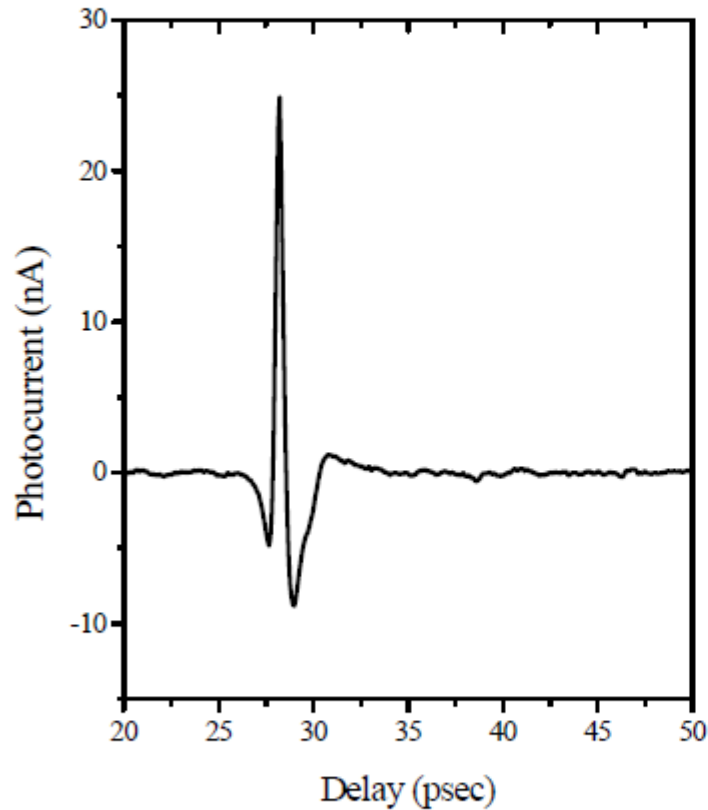
Photoconductive THz antenna



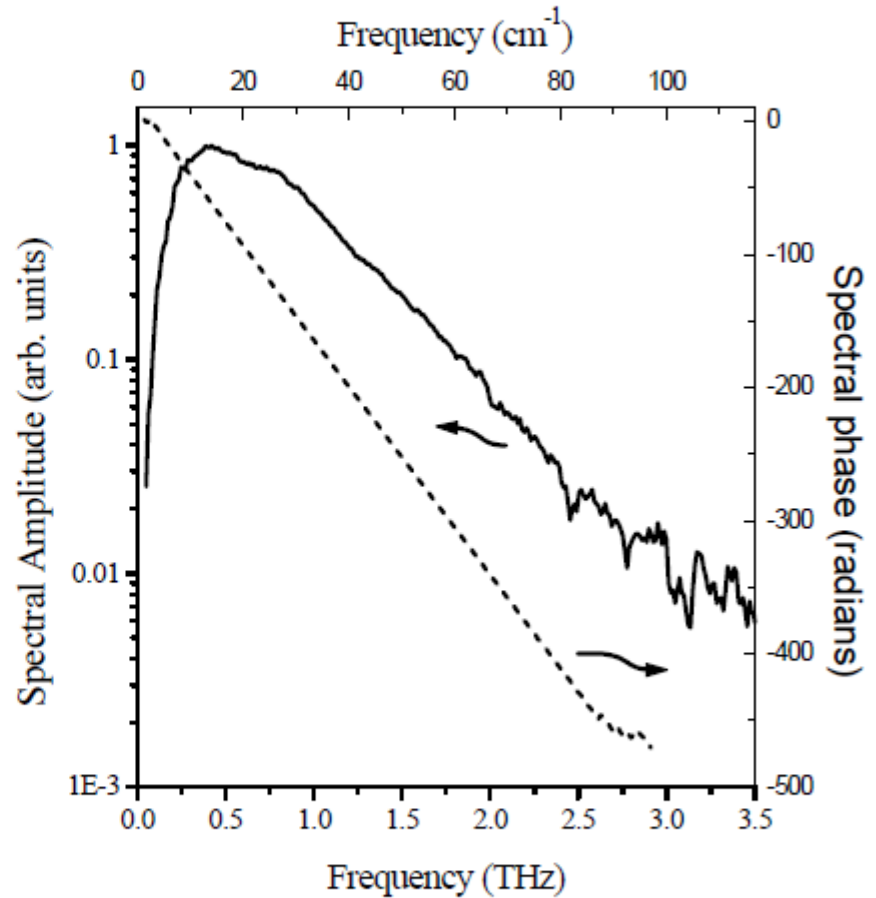
Terahertz time-domain spectroscopy



A THz pulse



Time - Domain



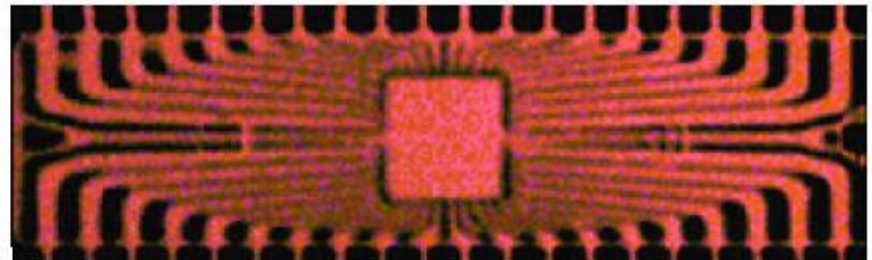
Frequency Domain

Terahertz imaging



← Visible Image

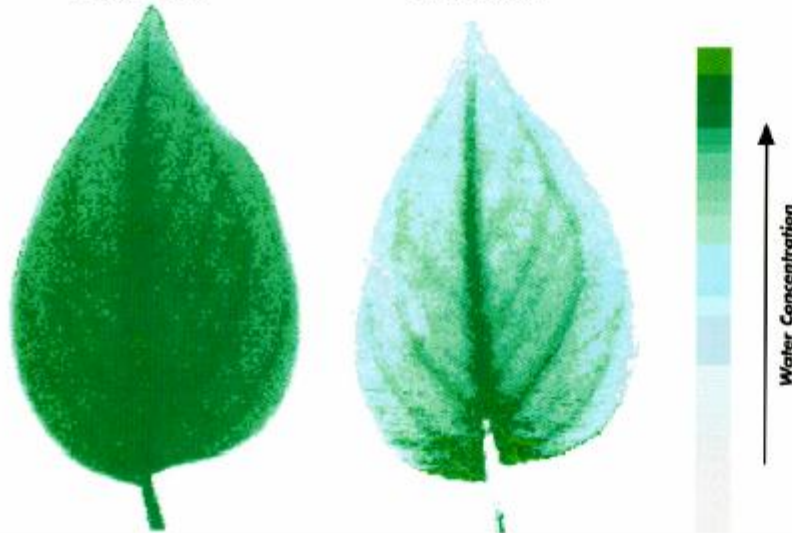
Terahertz Image →



Measuring Water Content

freshly cut leaf

after 48 hours

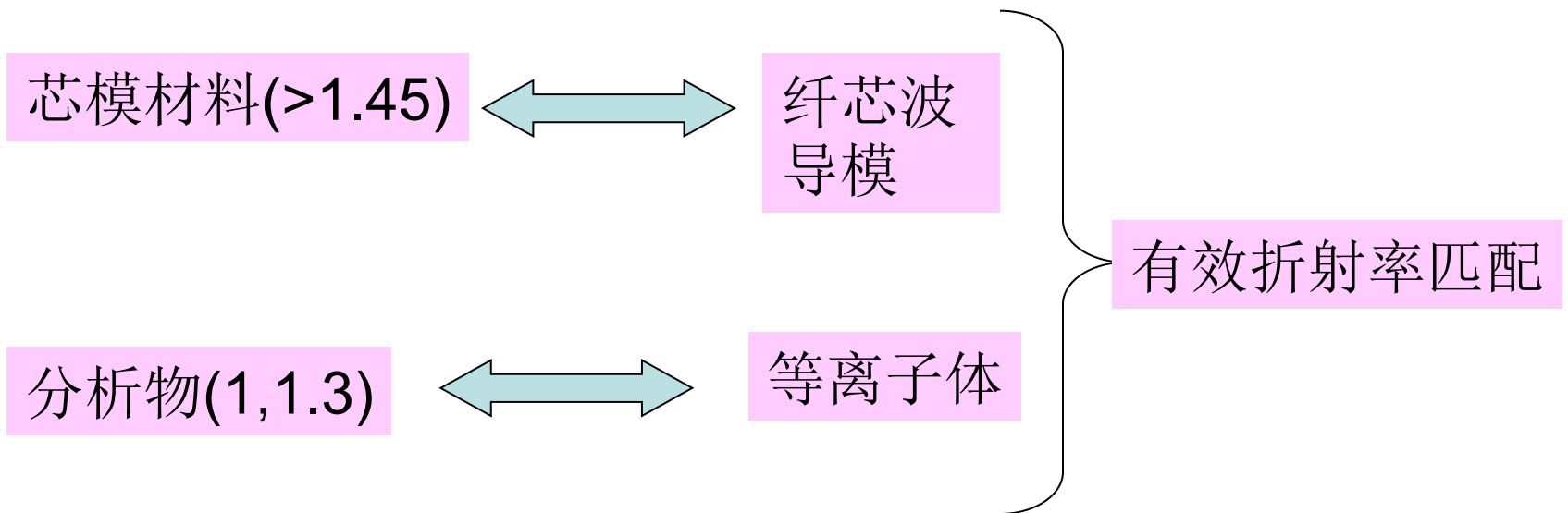


Possible THz Applications

- Security/container inspection
- Defect analysis
- Moisture monitoring
- Medical diagnostics
- Trace gas detection
- Biomedical imaging

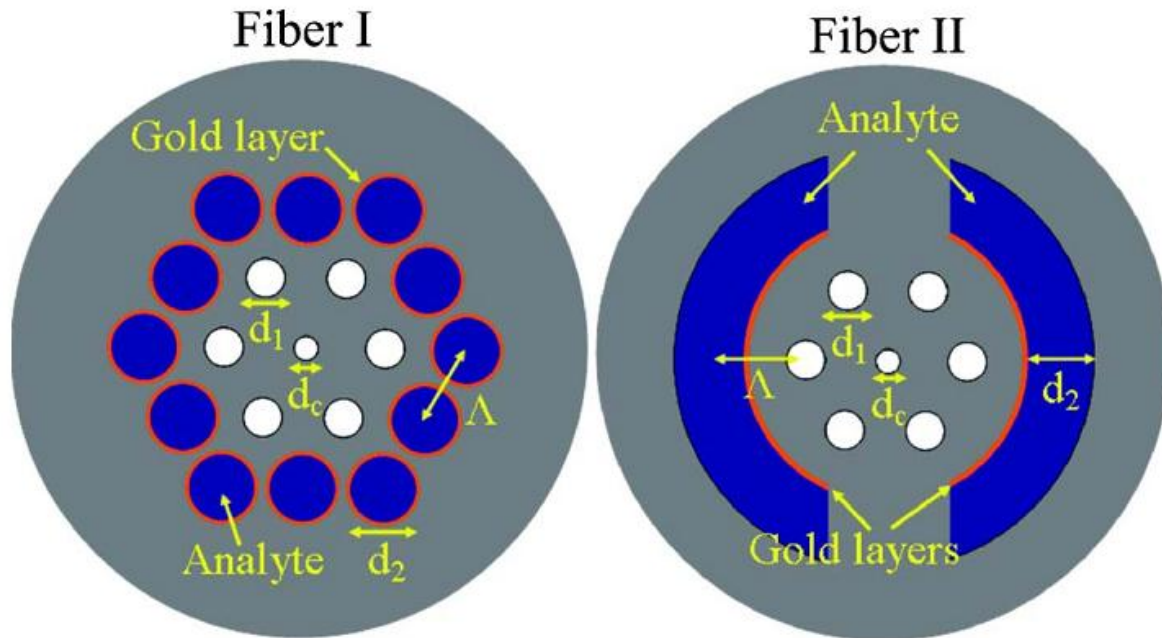
光子晶体光纤表面等离子体 共振传感器

传感器模式匹配:



在纤芯中引入小孔(d_c), 降低基模有效折射率
引入小孔(d_1), 调节耦合强度

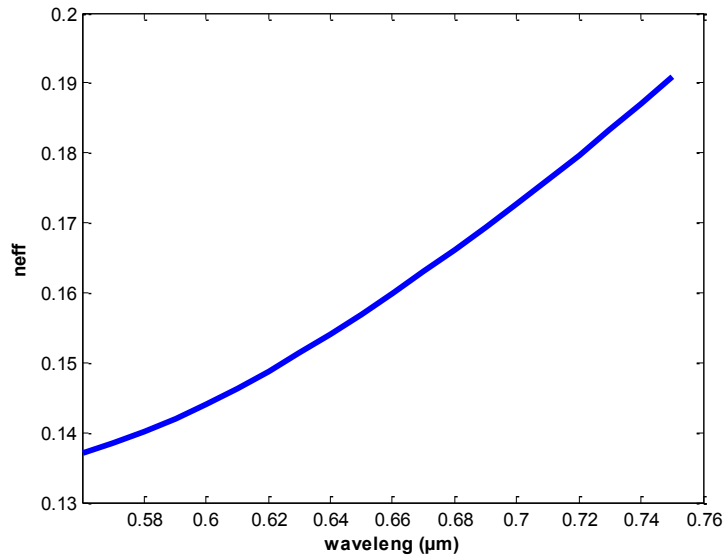
两种传感器模型：



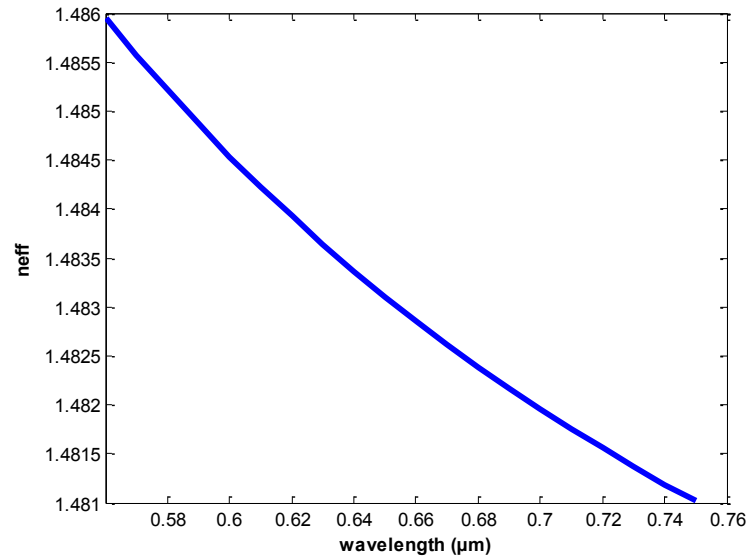
$$\Lambda = 2e-6m, d_c = 0.5 \Lambda, d_1 = 0.6 \Lambda, d_2 = 0.8 \Lambda$$

$n_{air} = 1.0, n_a = 1.33$ 金属层厚度 $4e-8m$

材料折射率：

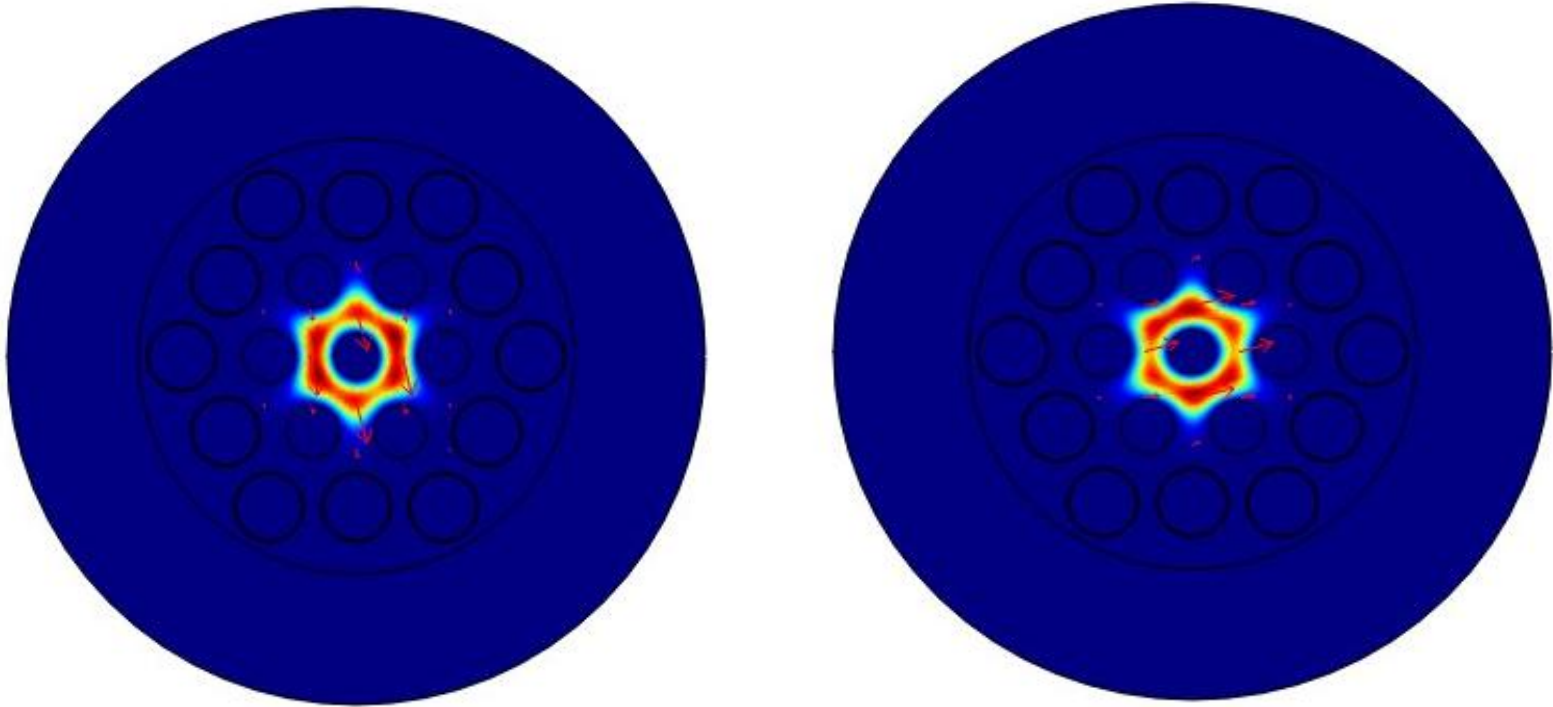


Drude 模型计算Au的有效折射率

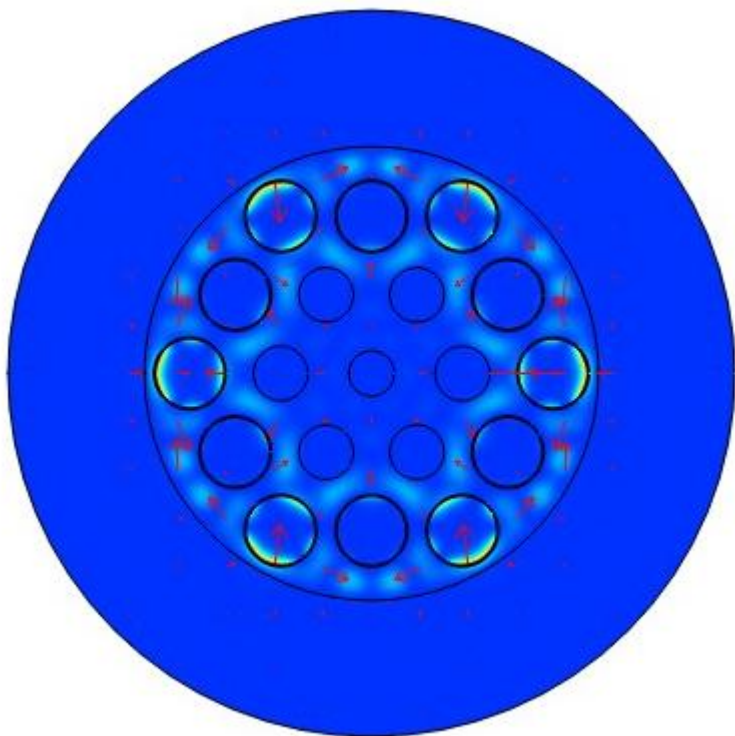


SiO_2 有效折射率

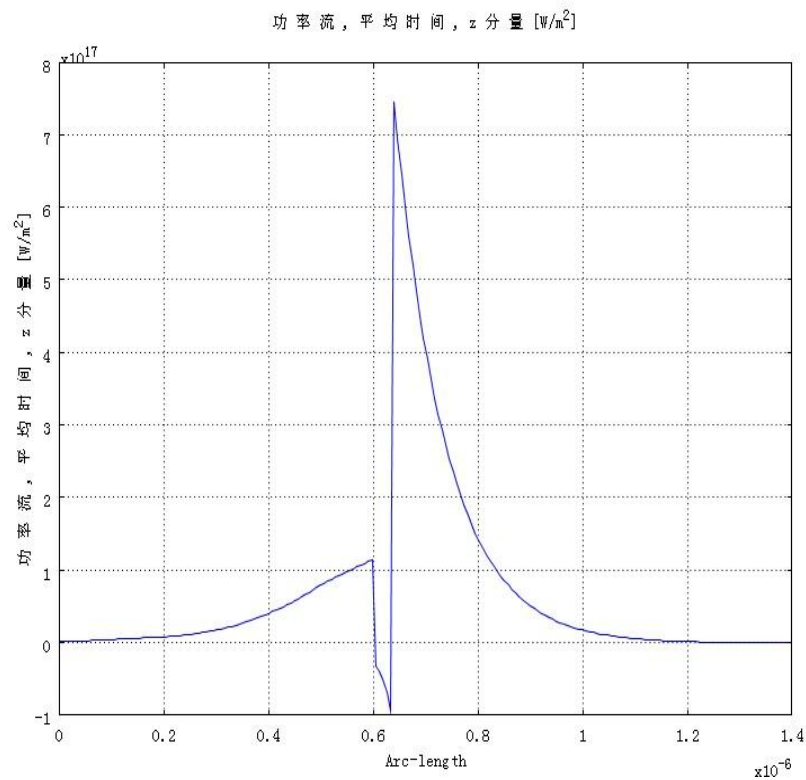
Fiber I:



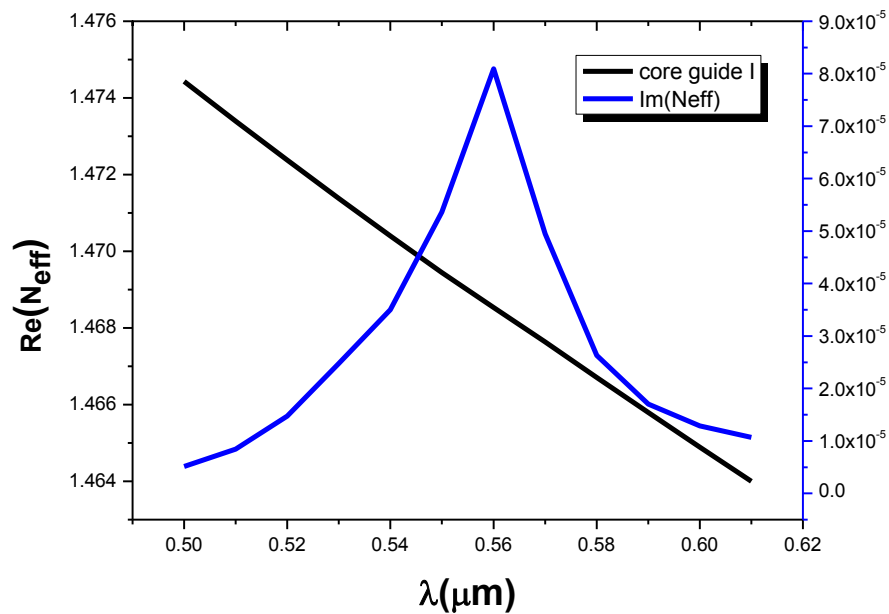
纤芯中基模图,由于结构的对称性,简并非常好



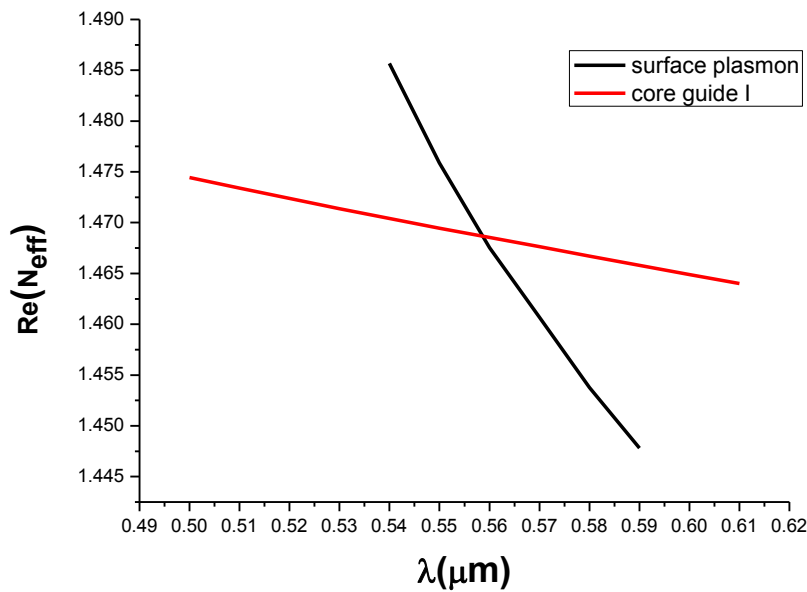
纤芯中激发的等离子模式图



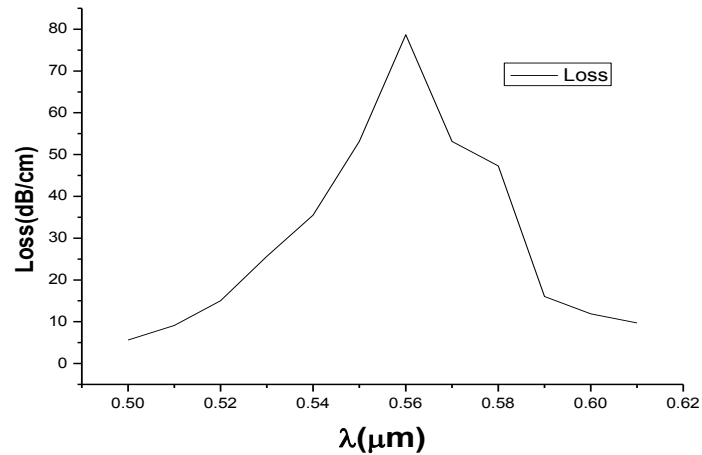
金属层表面能量分布图



纤芯中不同波长对应的基模有效折射率

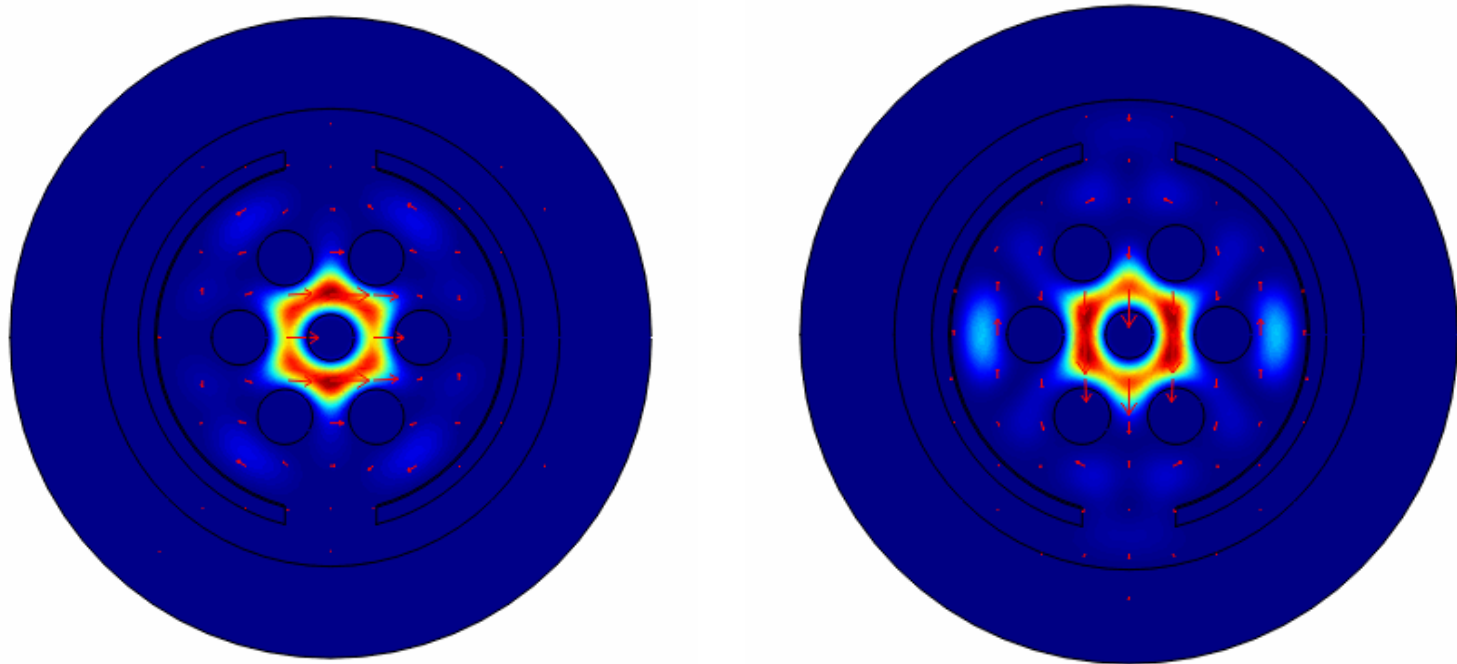


纤芯中基模与等离子模式有效折射率匹配

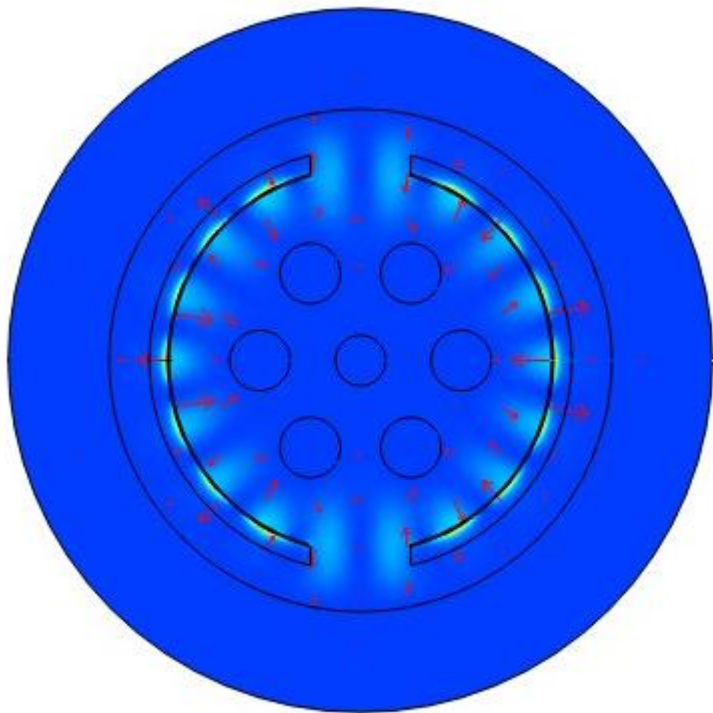


纤芯中不同波长对应的基模损耗图，波动趋势对应基模有效折射率的虚部，波峰对应基模与等离子体匹配点

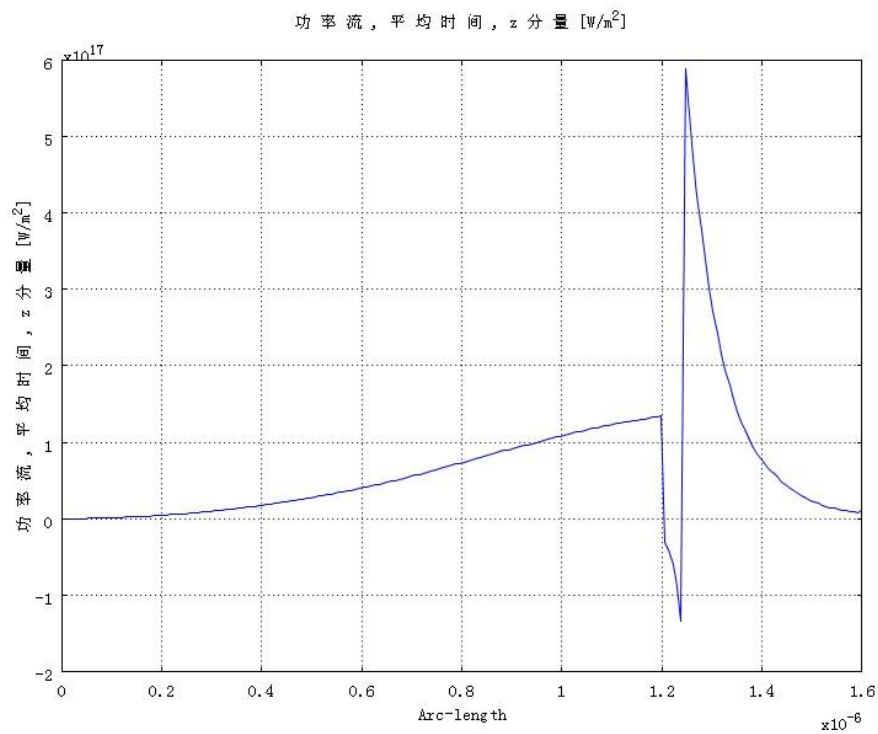
Fiber II:



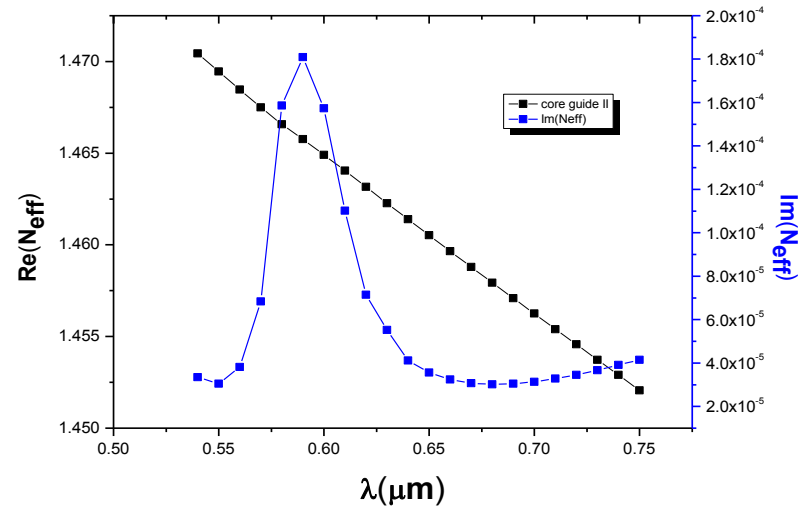
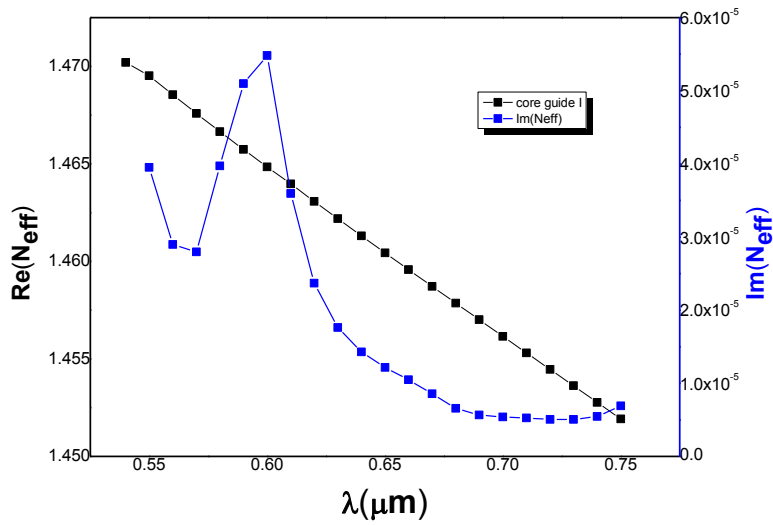
纤芯中基模图,由于结构的非对称性,简并效果不好



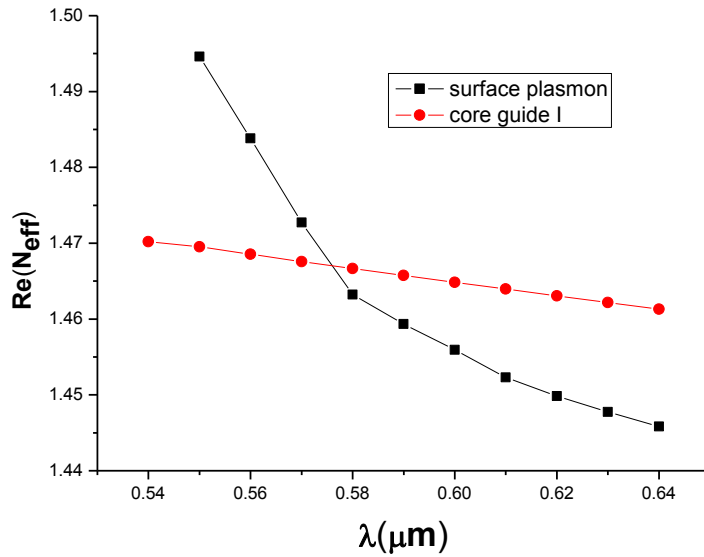
纤芯中激发的等离子模式图



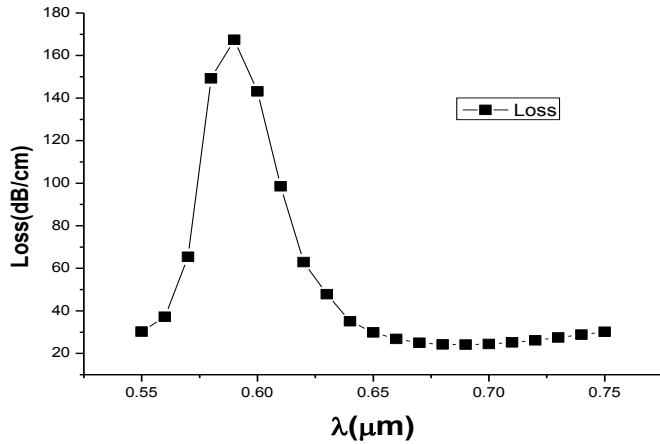
金属层表面能量分布图



纤芯中不同波长对应的基模有效折射率



纤芯中基模与等离子模式有效折射率匹配



纤芯中不同波长对应的基模损耗图

Evanescent Field Enhanced Gas Sensing in THz Range

Outline

- ✓ **Introduction**
- ✓ **The Dielectric Properties of Ferroelectric PVDF in THZ Range**
- ✓ **THz Plasemon-like Excitation at the PVDF/air Interface**
- ✓ **Sensitivity of Evanescent Field**
- ✓ **Discuss**

Introduction

- **The terahertz evanescent fields are used for spectroscopic measurements, absorption measured in liquids, and DNA hybridization detected**
- **The problems of SPP based sensor in THz range: (Loss and Phase matching)**

Introduction of SPP and SPP-based Sensing

$$E_{1y}^0 = E_{2y}^0 = 0$$

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = -\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}$$

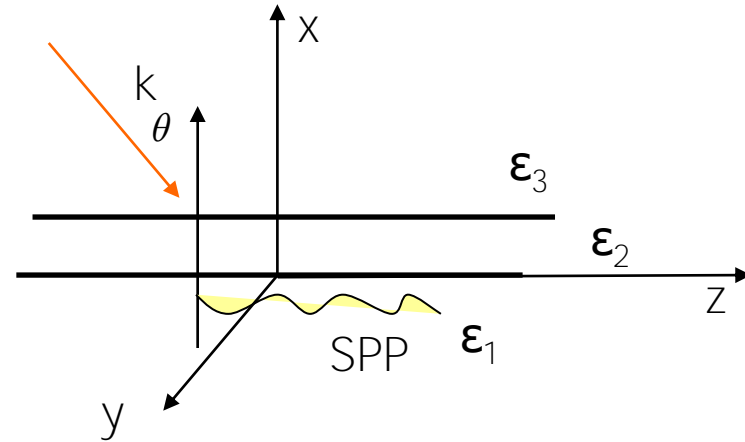
$$n_{\text{eff}} = \frac{\beta}{k_0} = \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}}$$

$$(\alpha^2 = \beta^2 - k_0^2 \epsilon)$$

$$K_{ev} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_0} \sin \theta$$

$$K_{SP} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}}$$

$$K_{ev} = K_{SP}$$



$$\sin \theta_{SP} = f(\omega, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3)$$

$$\sin \theta_{SP} = f(\lambda, n_1)(n_2, n_3 \rightarrow \text{cons})$$

$$n_1 = F(m)$$

The Dielectric Properties of Ferroelectric PVDF in THz Range

$$\epsilon_s = \epsilon_{opt} + \frac{(\epsilon_{dc} - \epsilon_{opt})\omega_{TO}^2}{\omega_{TO}^2 - \omega^2 + i\gamma\omega}$$

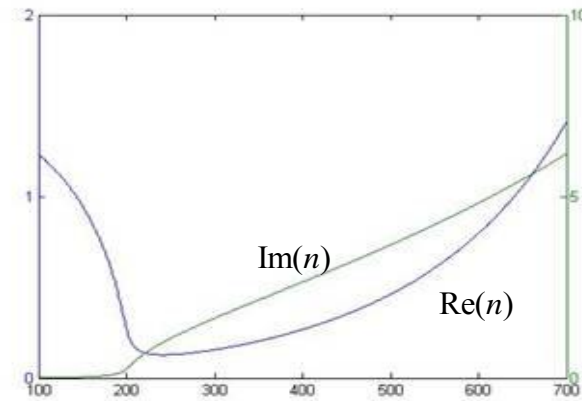
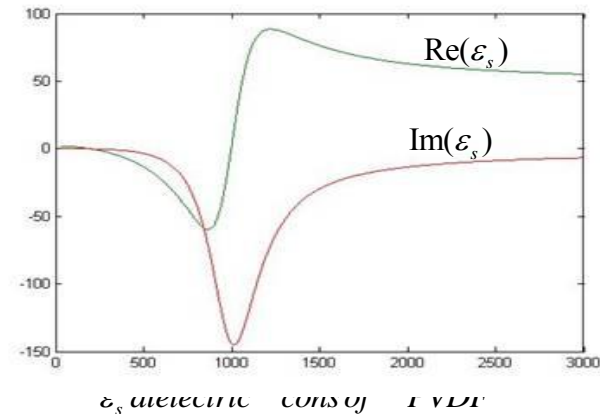
$$\epsilon_{opt} = 2$$

$$\epsilon_{dc} = 50$$

$$\gamma = 0.1\text{THz}$$

$$\omega_{TO} = 0.3\text{THz}$$

The ferroelectric PVDF layer is expected to support a plasmon-like excitation



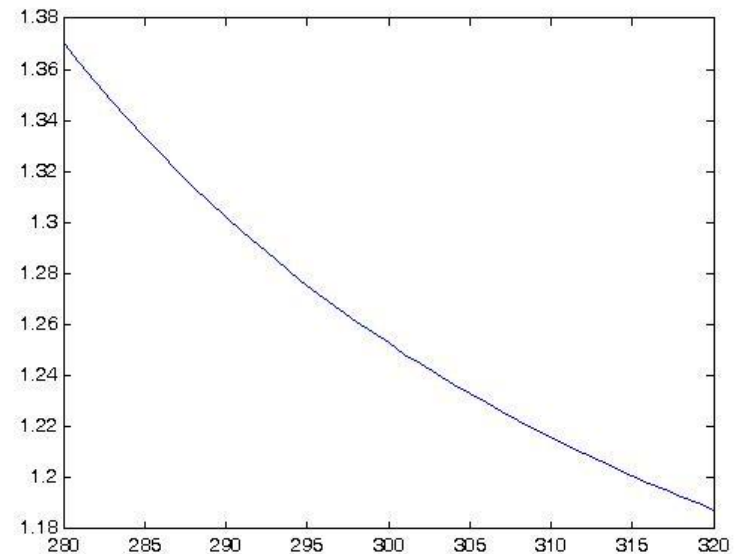
n refractive index of PVDF

THz Plasmon-like Excitation at the PVDF/air Interface

Phase matching condition

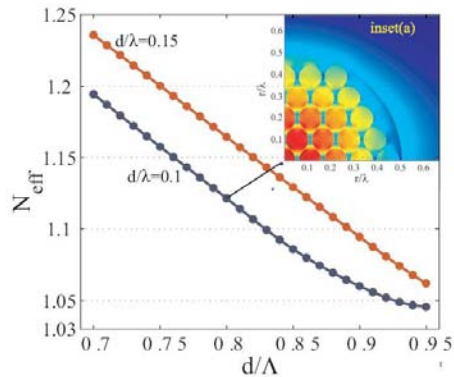
$$\vec{K}_{sp} = \vec{K}_{ev}$$

$$\vec{K}_{sp} = \vec{K}_0 \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}}$$



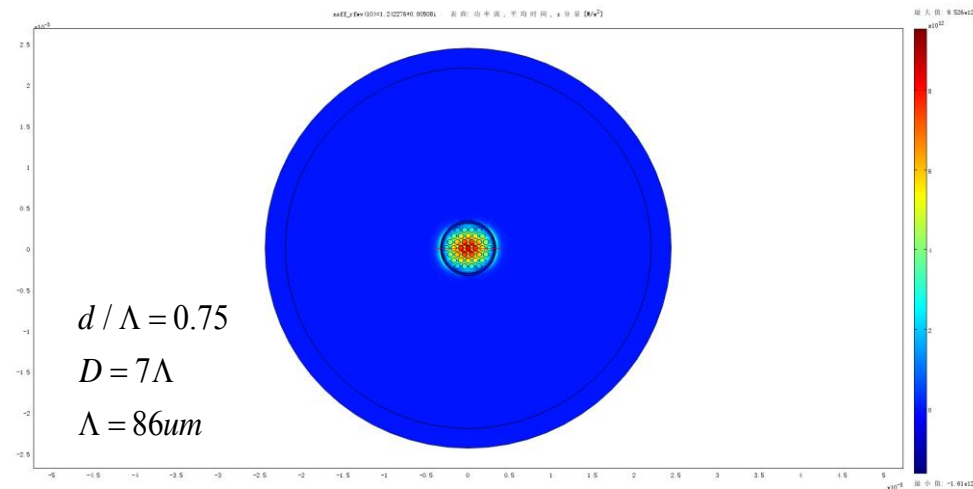
K_{sp} of PVDF / AIR structure

Porous Fiber and THz Evanescent Field Gas Sensor

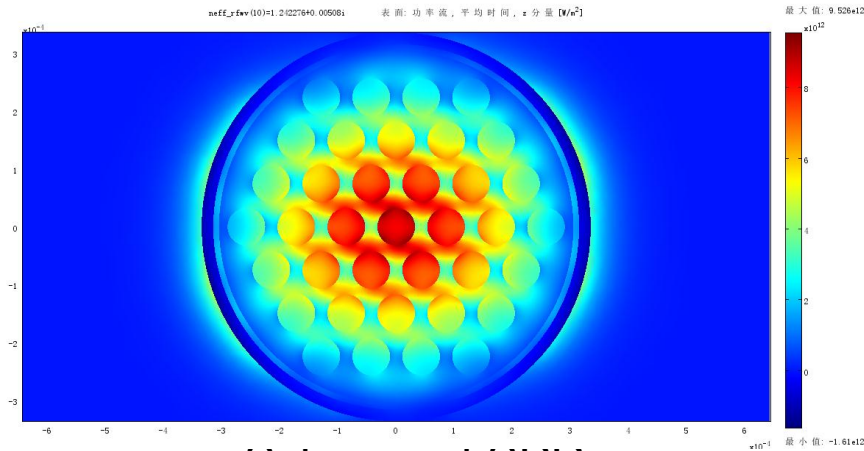


The alterability of Porous Fiber

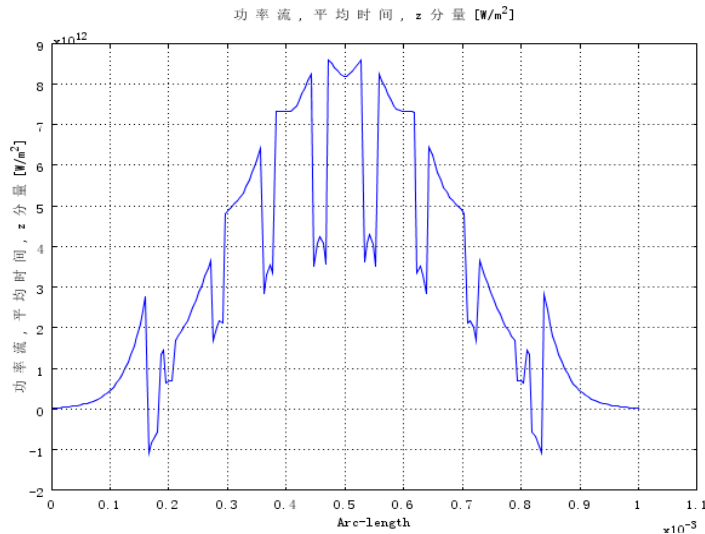
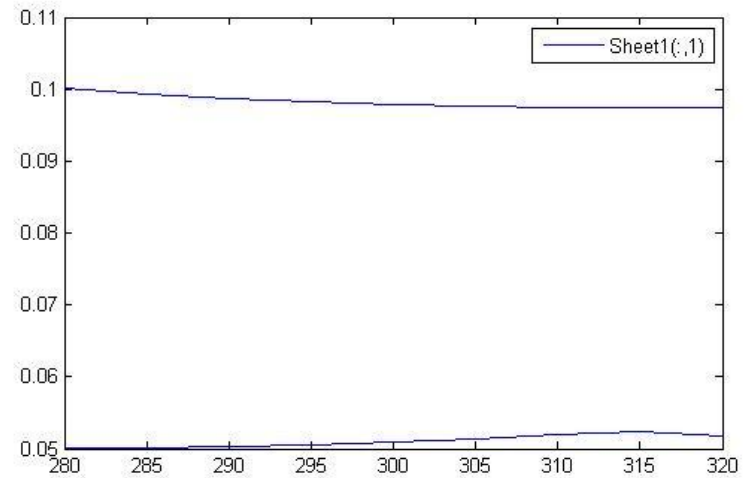
The cross-sectional area of the fiber based THz Evanescent filed gas sensor



Plasmon-like Excitation and Evanescent Field Enhanced



Scheme of SPR



Relative sensitivity coefficient

$$r = \frac{n_c}{n_{eff}} \frac{\iint_{A_{ev}} E_x H_y - E_y H_x ds}{\iint_{All} E_x H_y - E_y H_x ds}$$

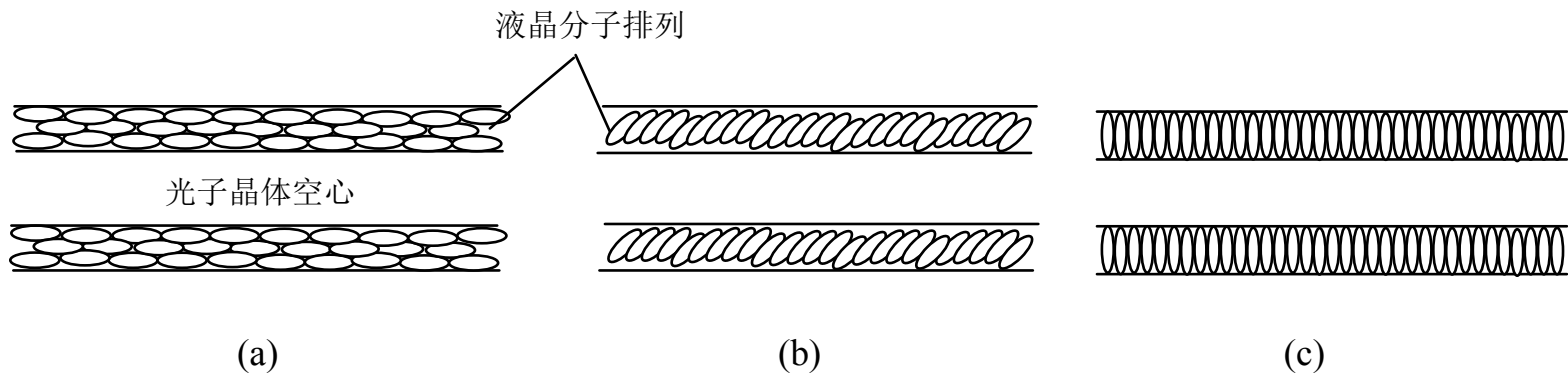
光子晶体光纤填充液晶的传感特性研究

一、研究背景

PCF也被称作微结构光纤或多孔光纤，其结构特点是横截面上存在着沿光纤轴向无限延伸的周期性分布的微气孔结构，这些气孔的大小和结构分布提供了一个很大的设计自由空间，正由于这些气孔的存在，如果我们向其中填充引入新的材料，PCF的传输特性就会发生改变（这里的研究对象主要是液晶），由此可以获得许多基于材料填充的可调光子晶体光纤功能器件，如光衰减器、光开关、光滤波器、色散补偿器等等。

研究背景

液晶是一种各向异性的物质。一般的情况下，光轴与分子的长轴方向一致，光学性质类似单轴晶体。但是液晶分子的折射率很容易通过外界温度、电场、磁场的调制。



二、研究内容

我做的工作是利用有限元软件Comsol仿真如下两点内容：

1、 TIR型PCF填充E7型液晶时的模场随温度变化的特性

理论依据：2005年，美国的Linjun等人通过实验数据拟合了E7型液晶的折射率随温度变化的关系式。

（Linj,Wu ST, et al. Infrared refractive indices of liquid crystals [J].J.Appl.Phys.2005）

研究内容

主要结论如下：

$$n_o(T) = A - BT - \frac{1}{3}(\Delta n)_0 \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^\beta$$

$$n_o(\lambda) = A_0 + \frac{B_0}{\lambda^2} + \frac{C_0}{\lambda^4}$$

温度变化时，寻常光折射率随温度的变化。公式在 $T < T_c$ 时成立， T_c 时液晶的相变点温度。A、B、C个参数是通过实验数据拟合出来的系数，波长不变时近似为常数。 A_0 、 B_0 、 C_0 是温度的函数，不同温度下取值见下表。

研究内容

各系数取值

$$A = 1.74, \quad B = 2.16 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$$

$$\beta = 0.12, (\Delta n)_0 = 0.6, \quad T_c = 330 \text{ K}$$

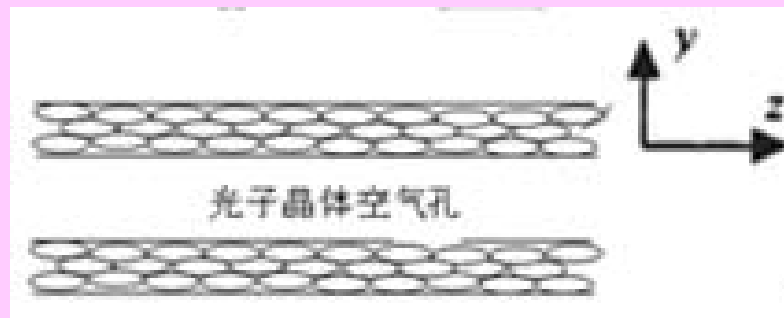
A_o 、 B_o 、 C_o 在各个温度下的取值：

Temperature (°C)	n_e			n_o		
	A_e	$B_e (\mu\text{m}^2)$	$C_e (\mu\text{m}^4)$	A_o	$B_o (\mu\text{m}^2)$	$C_o (\mu\text{m}^4)$
15	1.7055	0.0087	0.0028	1.5006	0.0065	0.0004
20	1.6993	0.0085	0.0027	1.4998	0.0067	0.0004
25	1.6933	0.0078	0.0028	1.4994	0.0070	0.0004
30	1.6846	0.0090	0.0025	1.4989	0.0072	0.0004
35	1.6761	0.0091	0.0025	1.4987	0.0071	0.0004
40	1.6662	0.0091	0.0024	1.5033	0.0049	0.0008
45	1.6565	0.0083	0.0024	1.5018	0.0068	0.0006
50	1.6395	0.0095	0.0020	1.5062	0.0063	0.0006

研究内容

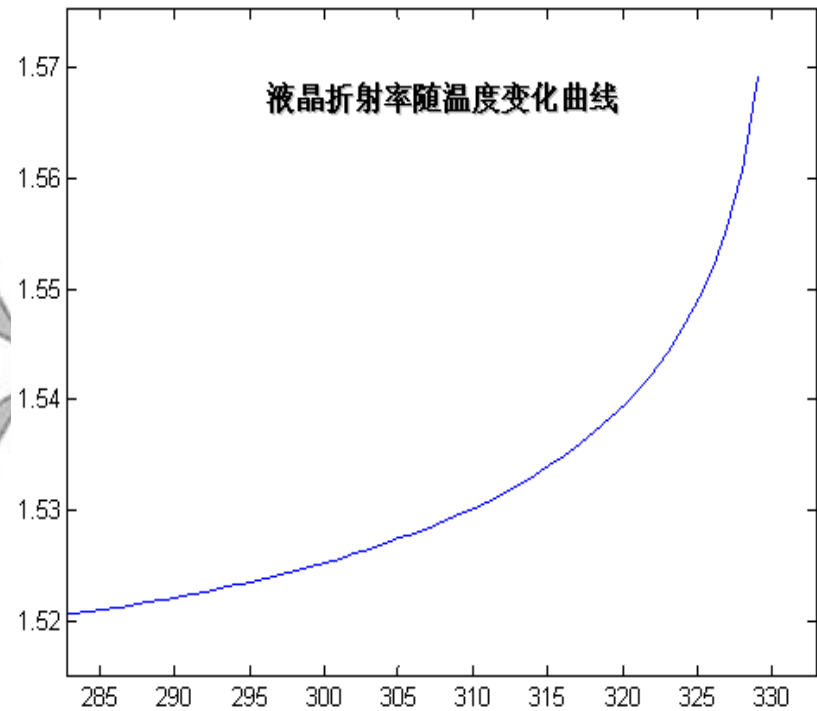
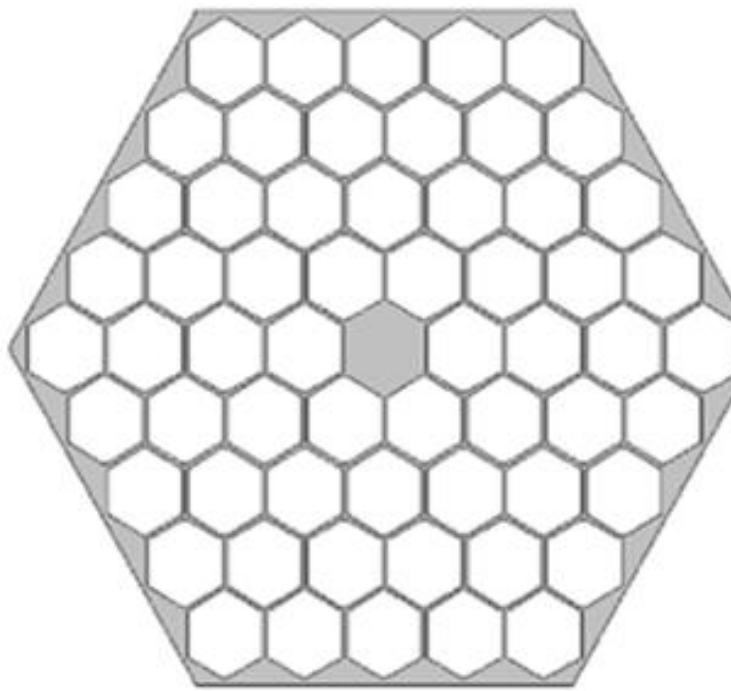
液晶填入PCF中，液晶分子的长轴都是沿着光纤轴向排列着的，温度改变时，液晶分子的指向随着温度的波动小微的改变，因此这种情况下光并不发生双折射，折射率满足

$$n_o = n_x = n_y, n_z = n_e$$

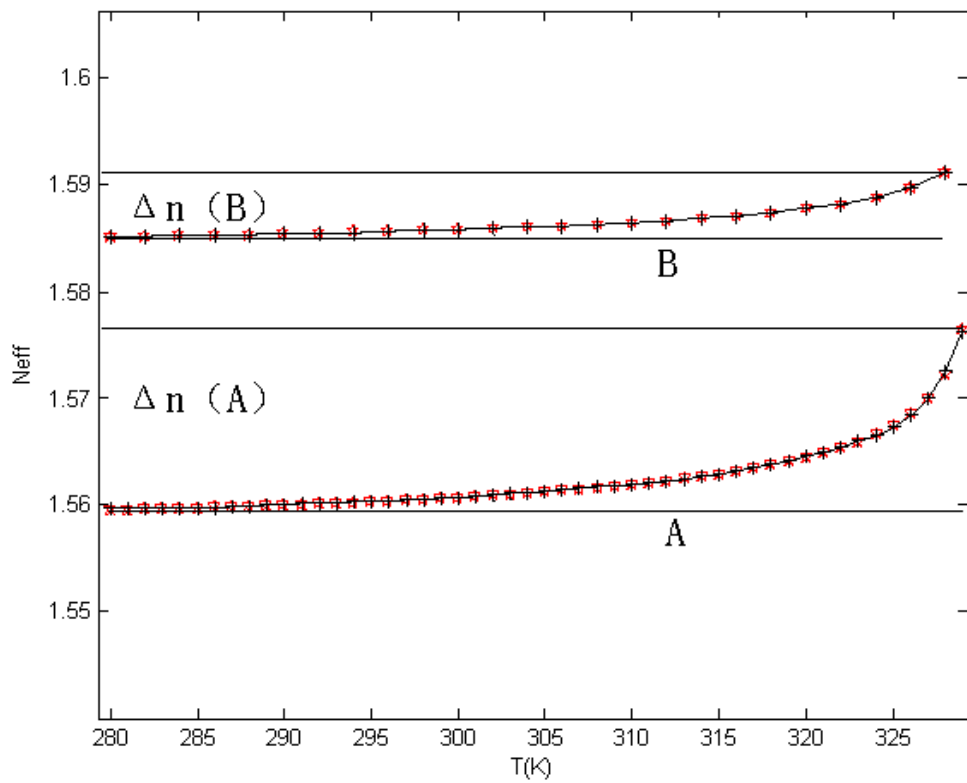
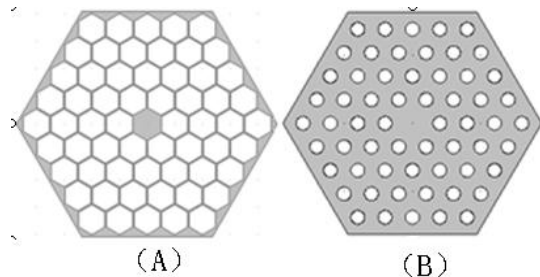


研究内容

光纤截面采用占空比很大的六边形空气孔结构，使得气孔中液晶折射率发生改变时，光纤基膜的折射率随之发生明显改变。基底材料 $n=1.6$ ，空气孔间距 $2\mu\text{m}$ ， $d=1.8\mu\text{m}$ 液晶折射率在 $1.52\sim 1.57$ 之间变化。



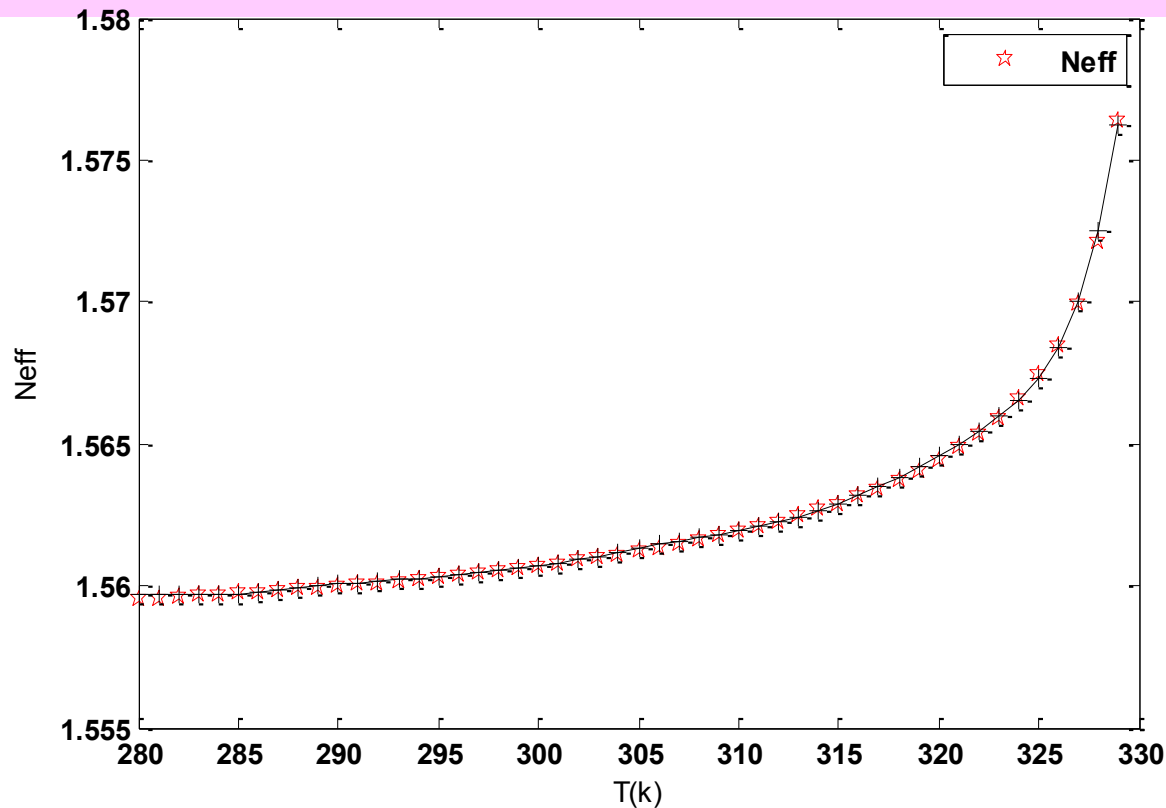
研究内容



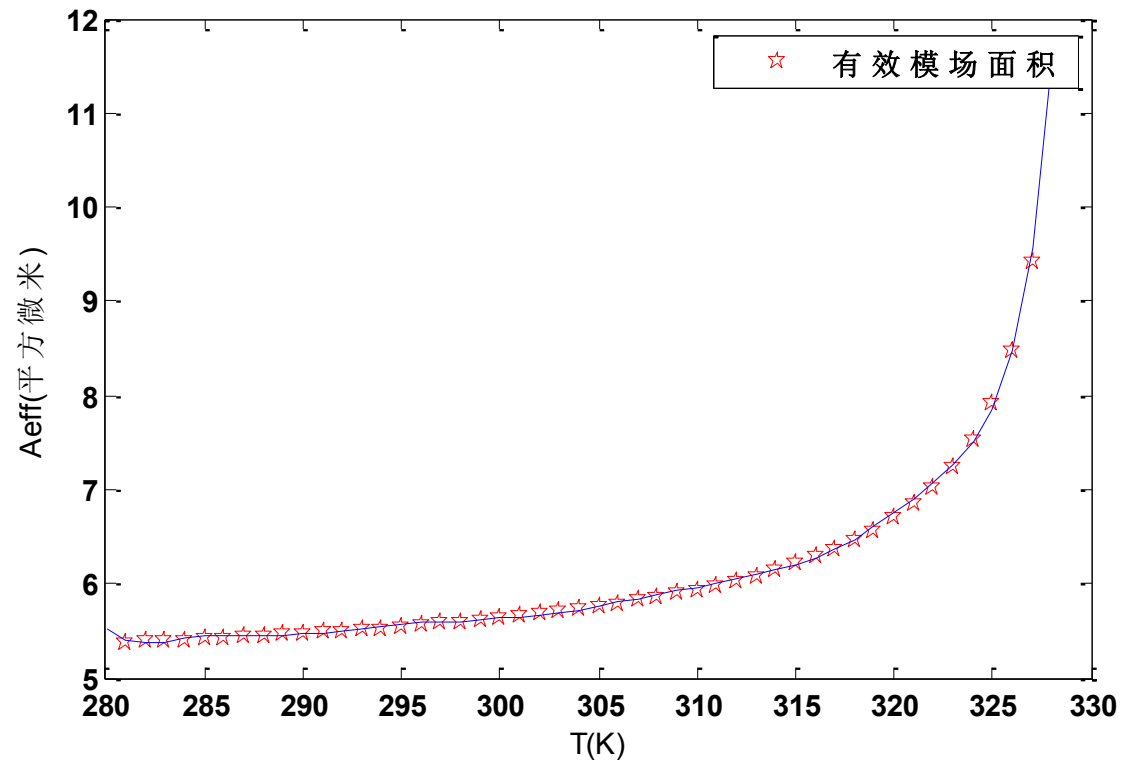
作为比照，左图
为占空比不同的两
种结构的基膜折射
率随着温度的变化
情况。**B**图的气孔
直径为 $d=1\mu\text{m}$ 。

计算结果

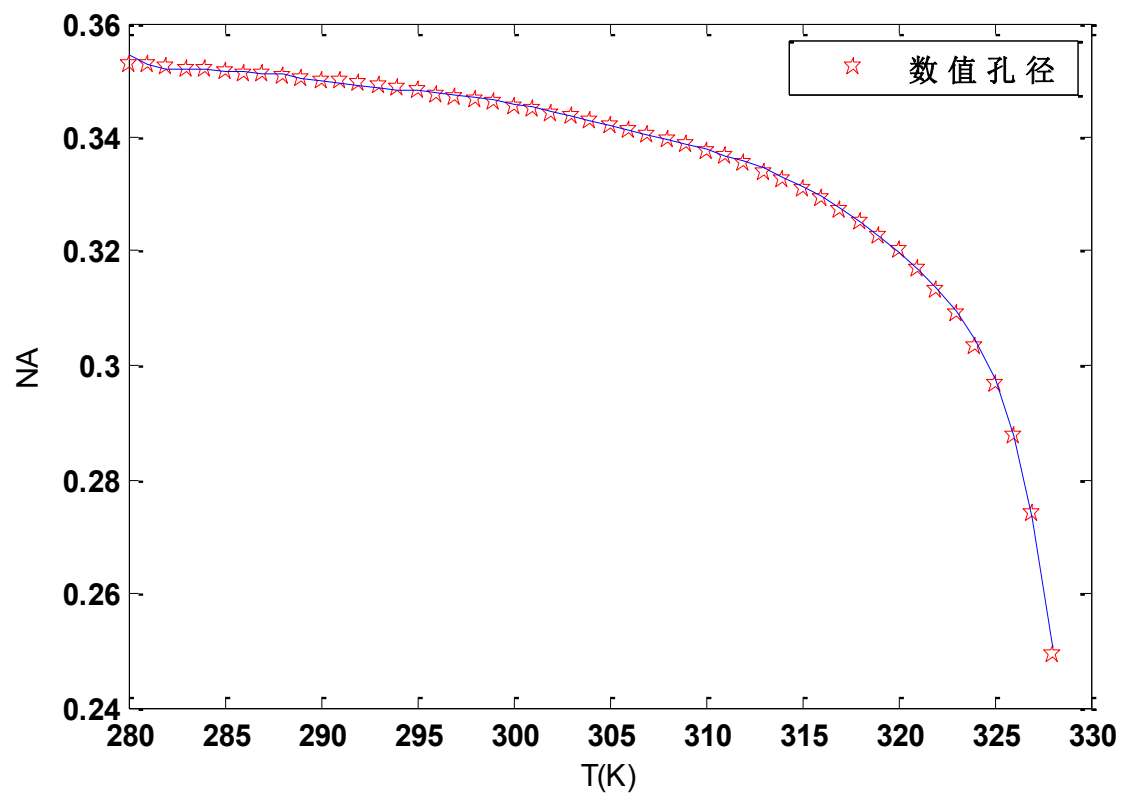
下图为在入射波长为1550nm时，温度范围280K ~330K之间，即7°C~57 °C之间的基膜折射率随温度的变化



计算结果

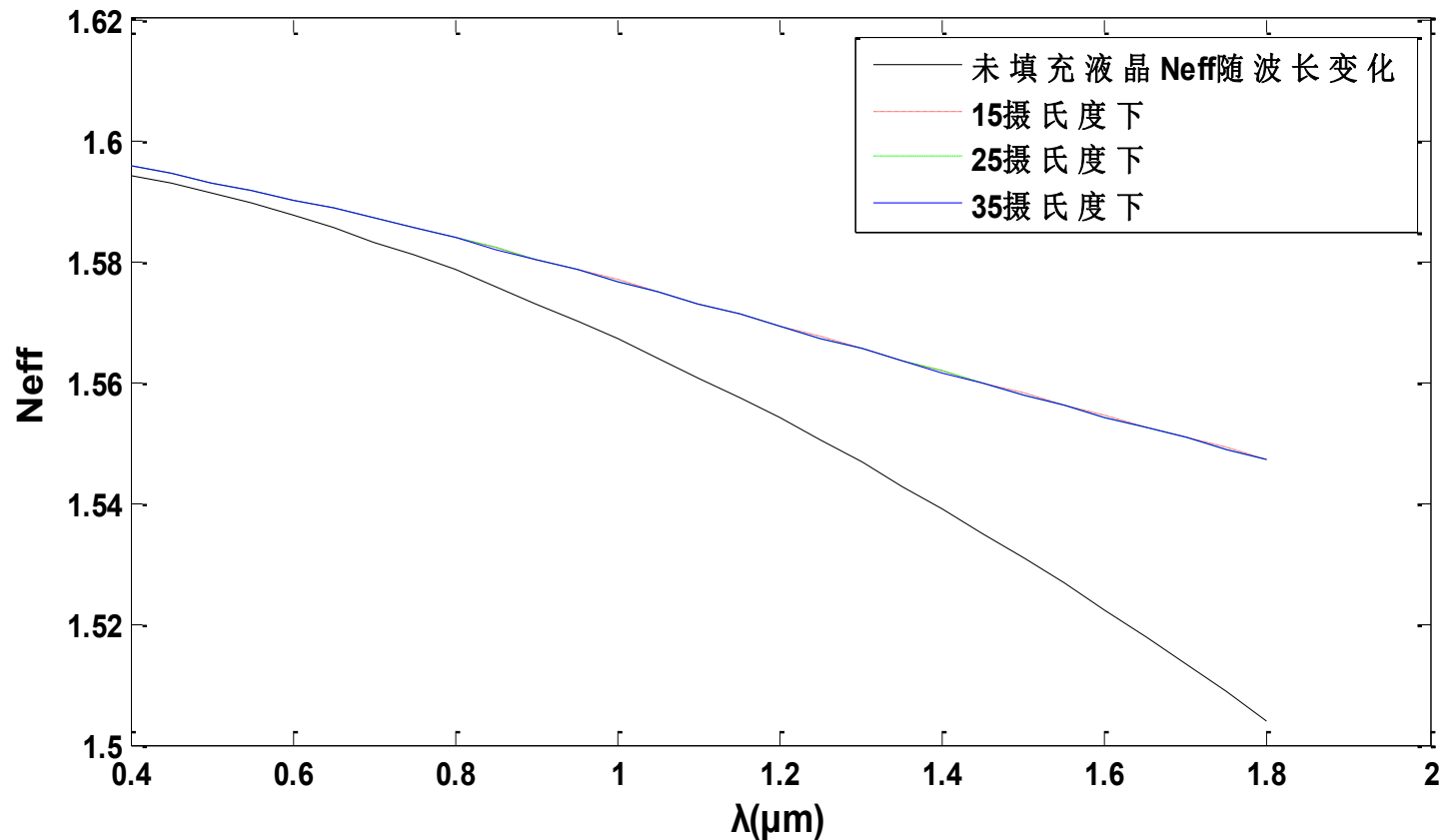


计算结果



计算结果

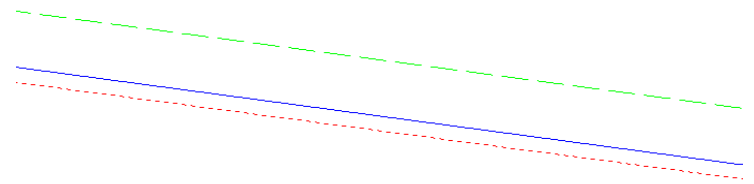
下图分别为未填充液晶和填充了液晶并且 $T=15^{\circ}\text{C}$ 、 25°C 、 35°C 时基膜折射率随波长变化关系。



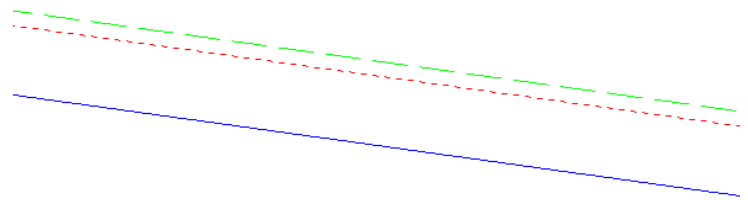
计算结果

--- 15摄氏度下
--- 25摄氏度下
— 35摄氏度下

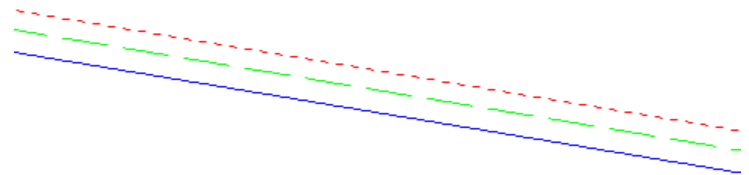
400nm~434.4nm左右



434.4nm左右~640nm左右

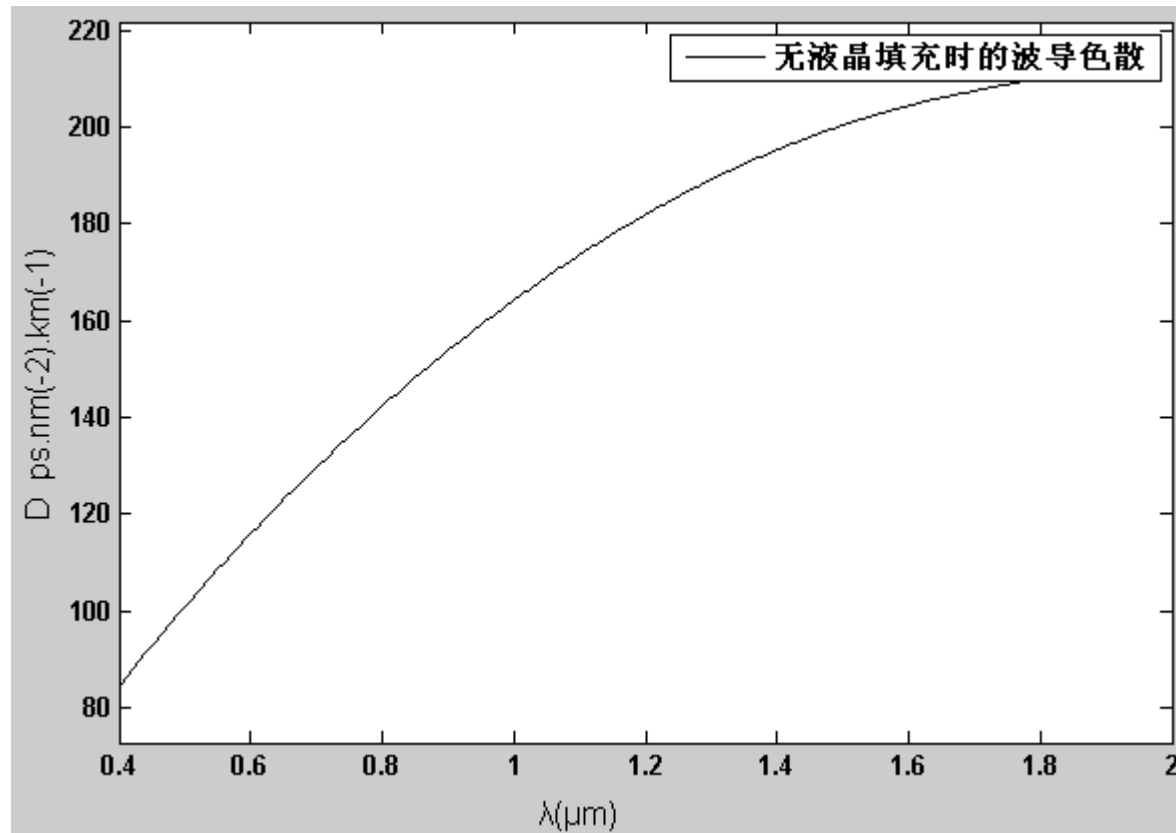


640nm左右~1800nm



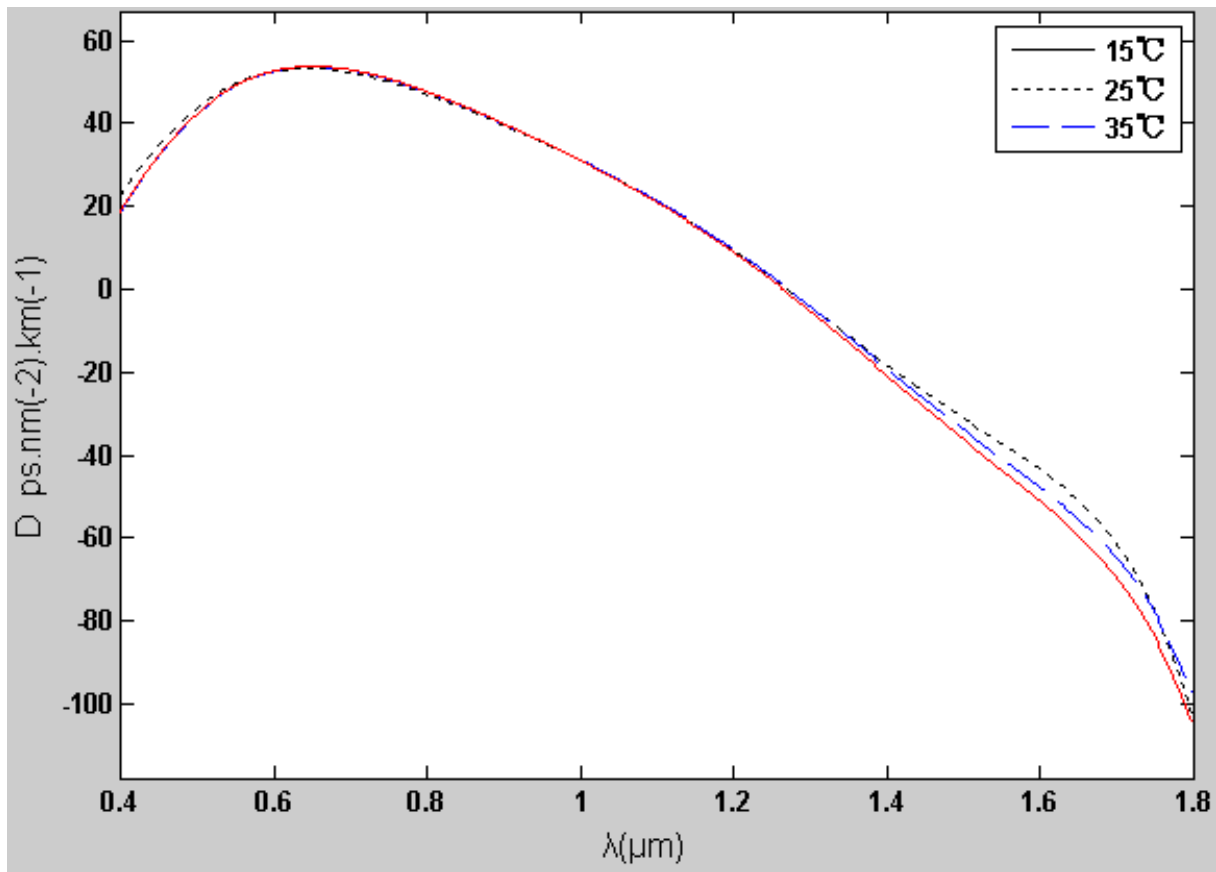
计算结果

下图为未填充液晶时波导色散D



计算结果

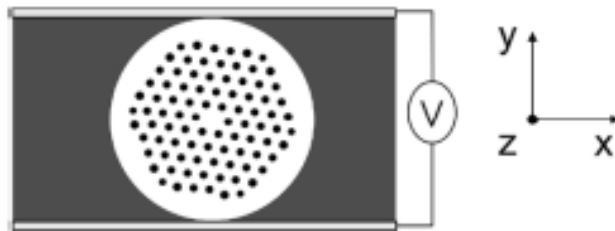
图分别为 $T=15^{\circ}\text{C}$ 、 25°C 、 35°C 时波导色散



研究内容

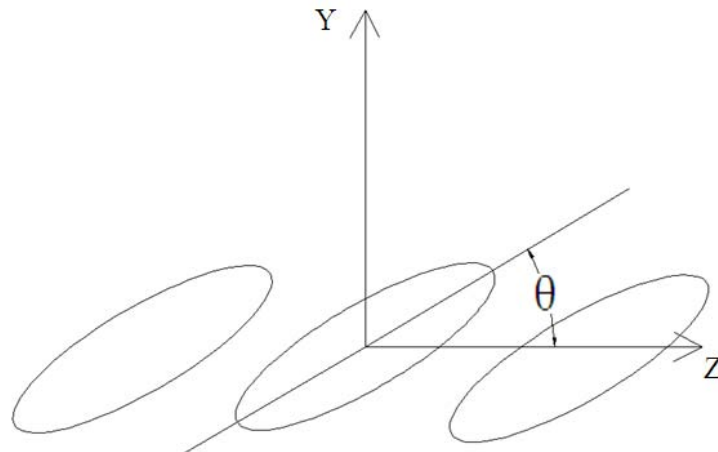
2 TIR型PCF填充E7型液晶时的模场随外加电场变化的特性

当对液晶盒加上外部电场时，由于在不同的电场强度作用下，会使液晶分子的长轴发生一个不同的倾角旋转。因此在这种状态下液晶的光轴与未加电场前不同，双折射也会受电场影响。这就是液晶的电控双折射效应。利用这一性质可以制成光偏转器和光调制器（在这里电压方向沿Y轴方向）。



研究内容

填充到PCF纤芯空气孔里液晶分子的排列方向主要取决于毛细管的直径、边界条件和外加电场。当没有外加电场时，液晶分子的排列方向是由毛细孔内侧与液晶分子的相互作用所决定，一般是沿着光纤的Z轴方向。当施加一个沿着Y方向可调的电场时，液晶分子将偏离z轴，分子长轴与光纤轴有一个夹角 θ ，液晶在Y方向的偏振光变成了非寻常光，而X轴方向的偏振光为寻常光。



研究内容

液晶的X轴方向和Y轴方向的偏振光的折射率分别为：

$$n_x = n_o$$
$$n_y = \left(\frac{\sin^2 \theta}{n_e^2} + \frac{\cos^2 \theta}{n_o^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad \theta = \begin{cases} 0, E_{eff} \leq E_C \\ \frac{\pi}{2} - 2 \tan^{-1} \left[\exp\left(-\frac{E_{eff} - E_C}{30E_C}\right) \right], E_{eff} > E_C \end{cases}$$

E_{eff} 称为作用在液晶上控制其分子排列方向的那部分电压为有效电压， E_C 是阈值电场，只与液晶分子本身性质有关。

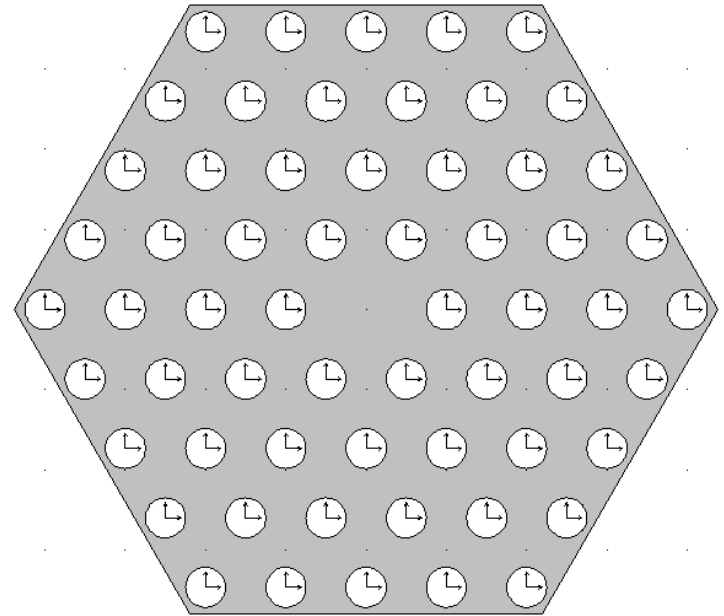
上述两个公式引自黄芳云，杨东，光子晶体液晶光纤的光波导特性，光电子技术，Vol. 29 No.1 Mar2009

研究内容

这样，我们就得到了空气孔内沿X和Y两个方向的折射率 n_x 和 n_y 。现在亟待解决的问题有两个：

1如何在Comsol中设置双折射率,如何将基膜的偏振方向与O光E光的偏振方向相对应。

2如何在Comsol中用温度、电场实现对可测量的物理量的调制,如出射光强、相位、偏振态。



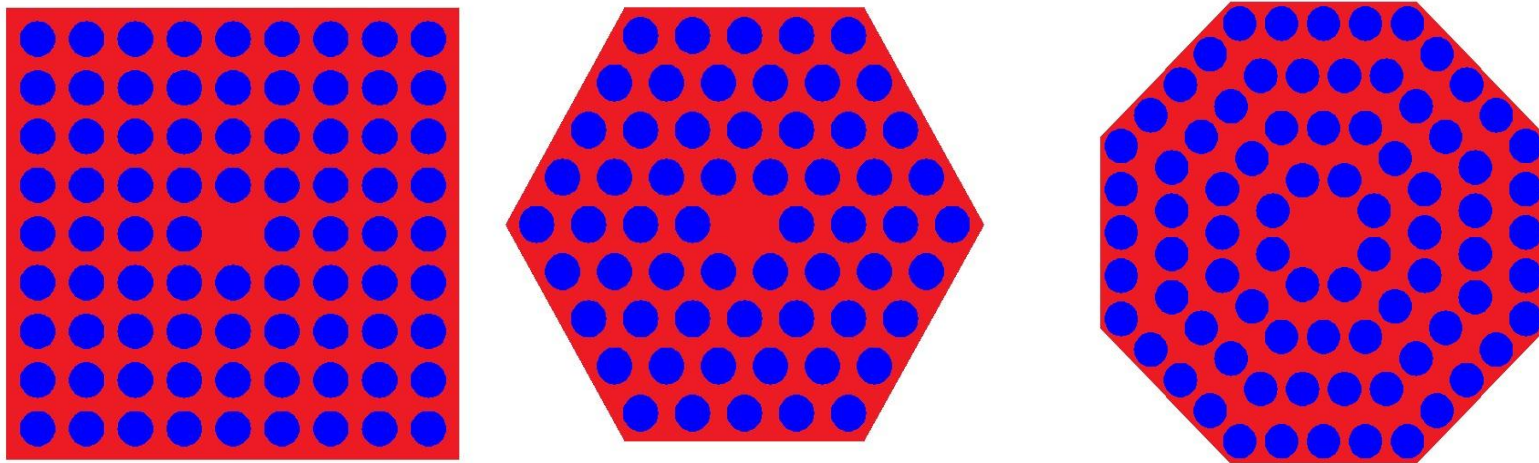
光子晶体光纤的特性参数的数值模拟

目录

- 1 光子晶体光纤的结构.....●
- 2 光子晶体光纤的包层模特性.....●
- 3 光子晶体光纤导光特性.....●
- 4 光子晶体光纤的色散和损耗.....●

$$AFF = A_{hole} / A_{cell}$$

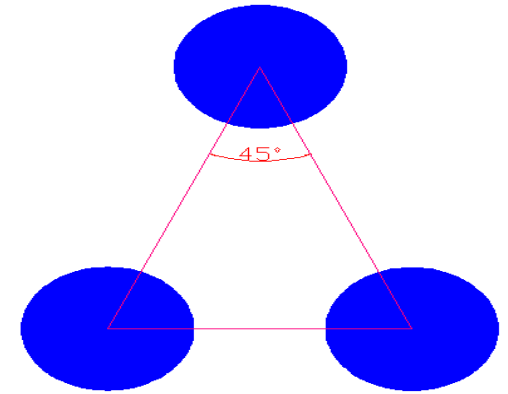
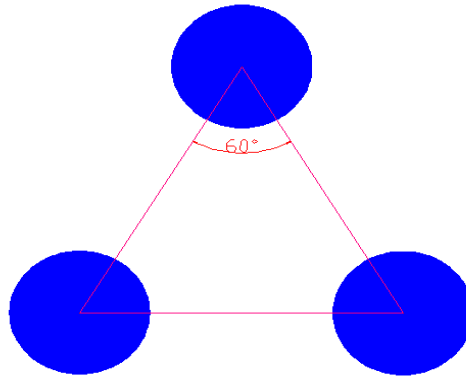
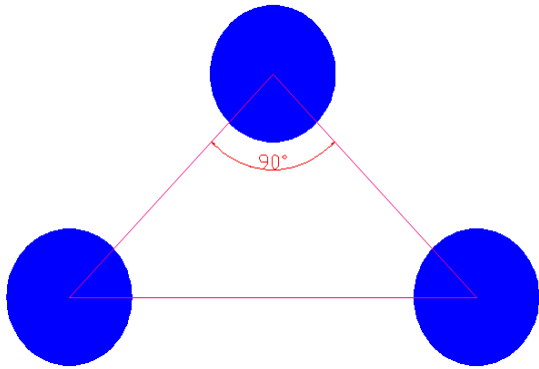
光子晶体光纤的结构



空气空的填充率（Air-Filling Fraction, AFF）

$$AFF = A_{hole} / A_{cell}$$

光子晶体光纤的结构



S-PCF

$$AFF = A_{hole} / A_{cell} = \pi \left(\frac{d}{2\Lambda} \right)^2$$

H-PCF

$$AFF = A_{hole} / A_{cell} = (2\pi / \sqrt{3}) \left(\frac{d}{2\Lambda} \right)^2$$

O-PCF

$$AFF = A_{hole} / A_{cell} = (2\pi / \sqrt{2}) \left(\frac{d}{2\Lambda} \right)^2$$

光子晶体光纤的包层模特性

光子晶体光纤的包层区由周期性排列的圆形空气孔组成，芯区由石英构成，包层的平均折射率低于芯区，类似于传统光纤，只有传播常数：

$$k_0 n_{cl} < \beta_{eff} < k_0 n_{co} \quad n_{cl} < n_{eff} < n_{co}$$

包层填充基模(Fundamental Space-Filling Mode缩写FSM)的概念来分析包层的特性。FSM可以被看作是对一给定波长、周期性结构中可能达到的最高的有效折射率值所对应的辐射模。

$$n_{FSM} = n_{cl}$$

光子晶体光纤的包层模特性

$n_{eff_rfw}(5)=1.282795$

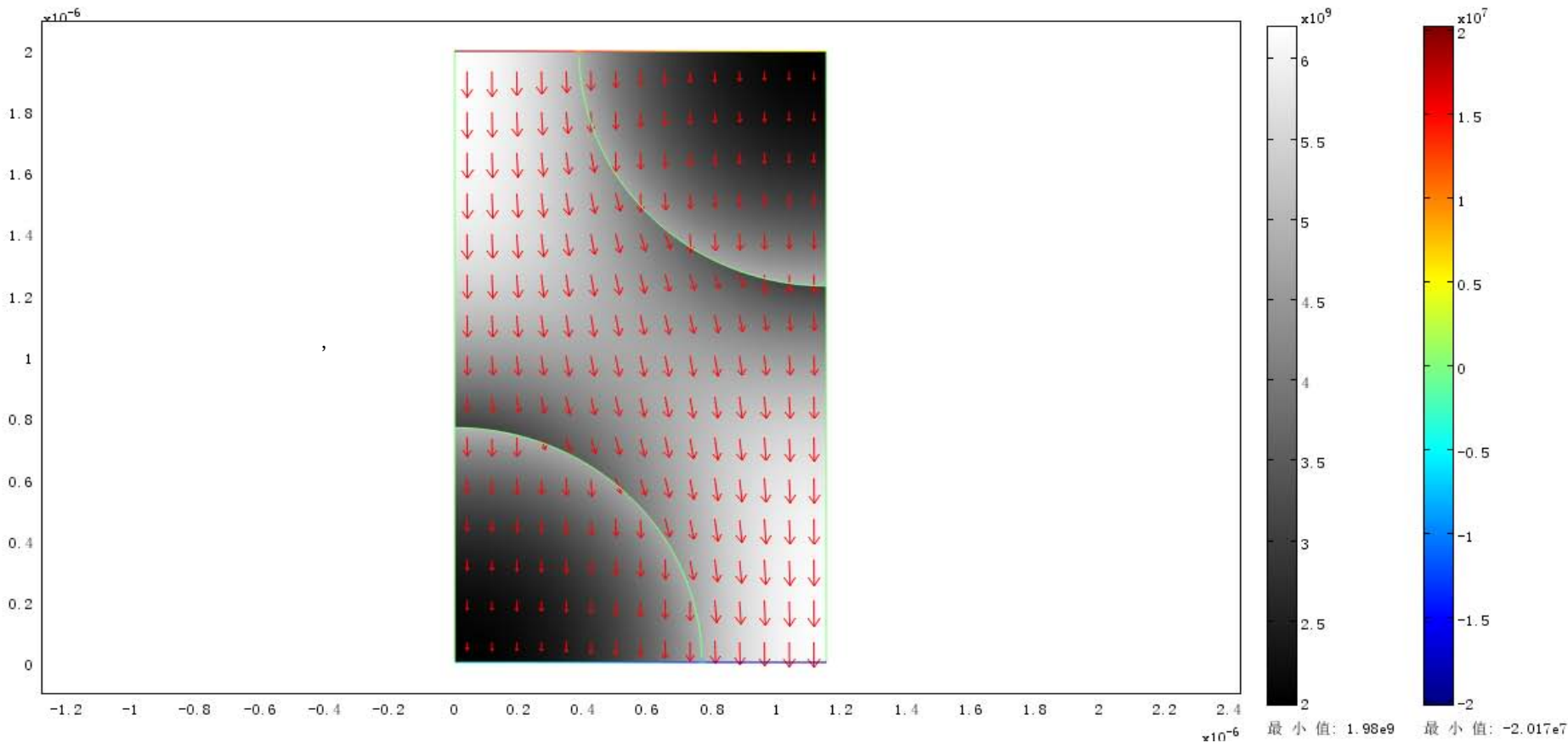
表面: 电场, 归一 [V/m]

边界: 表面电流密度, z 分量 [A/m]

箭头: 电场

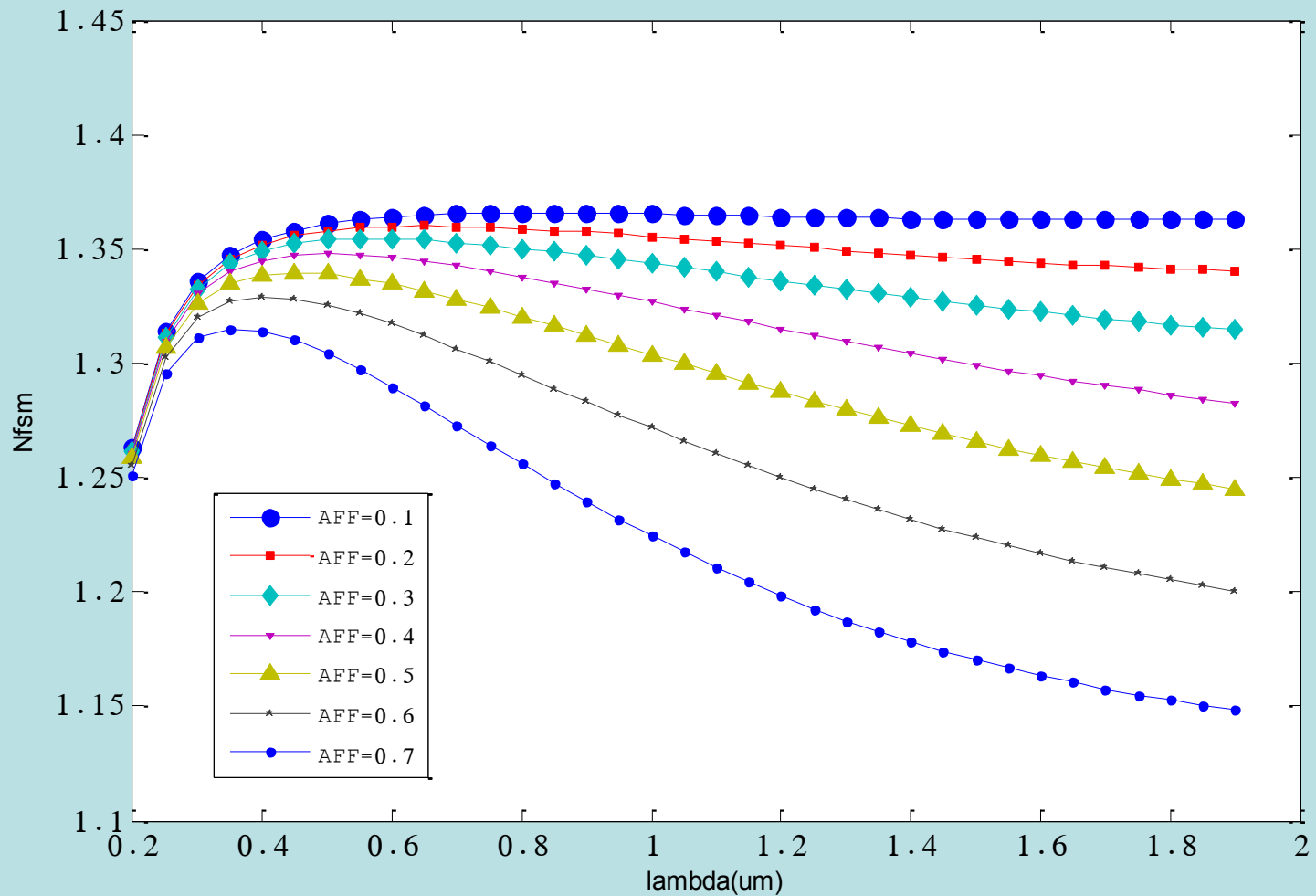
最大值: $6.198e9$

最大值: $2.017e7$



H-PCF的包层填充基膜

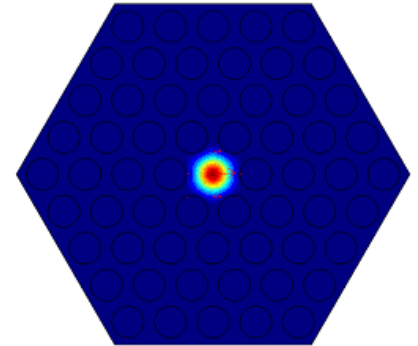
$\Lambda = 2.3 \mu\text{m}, AFF = 0.4$



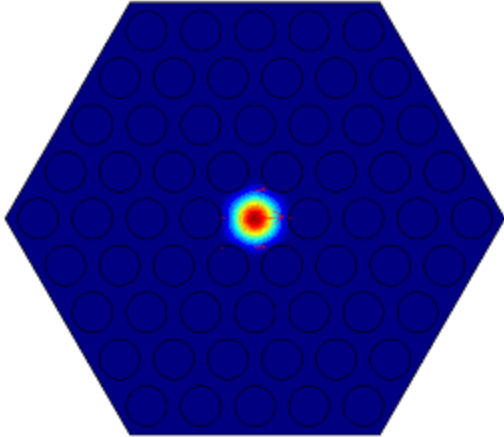
光子晶体光纤导光特性

- 1、模场分布
- 2、模式的有效折射率
- 3、模式的有效传输常数
- 4、模场的有效面积
- 5、数值孔径

以上都可以用COMSOL软件模拟出

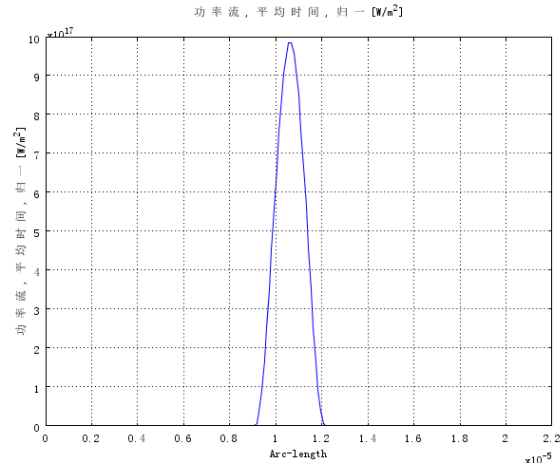


模场分布

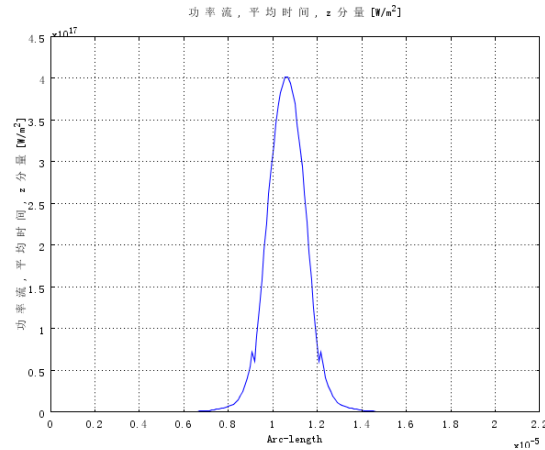
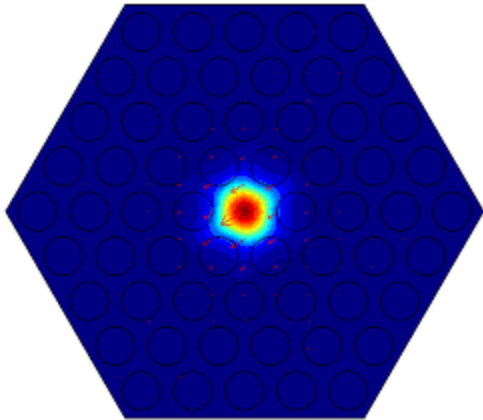


H-PCF

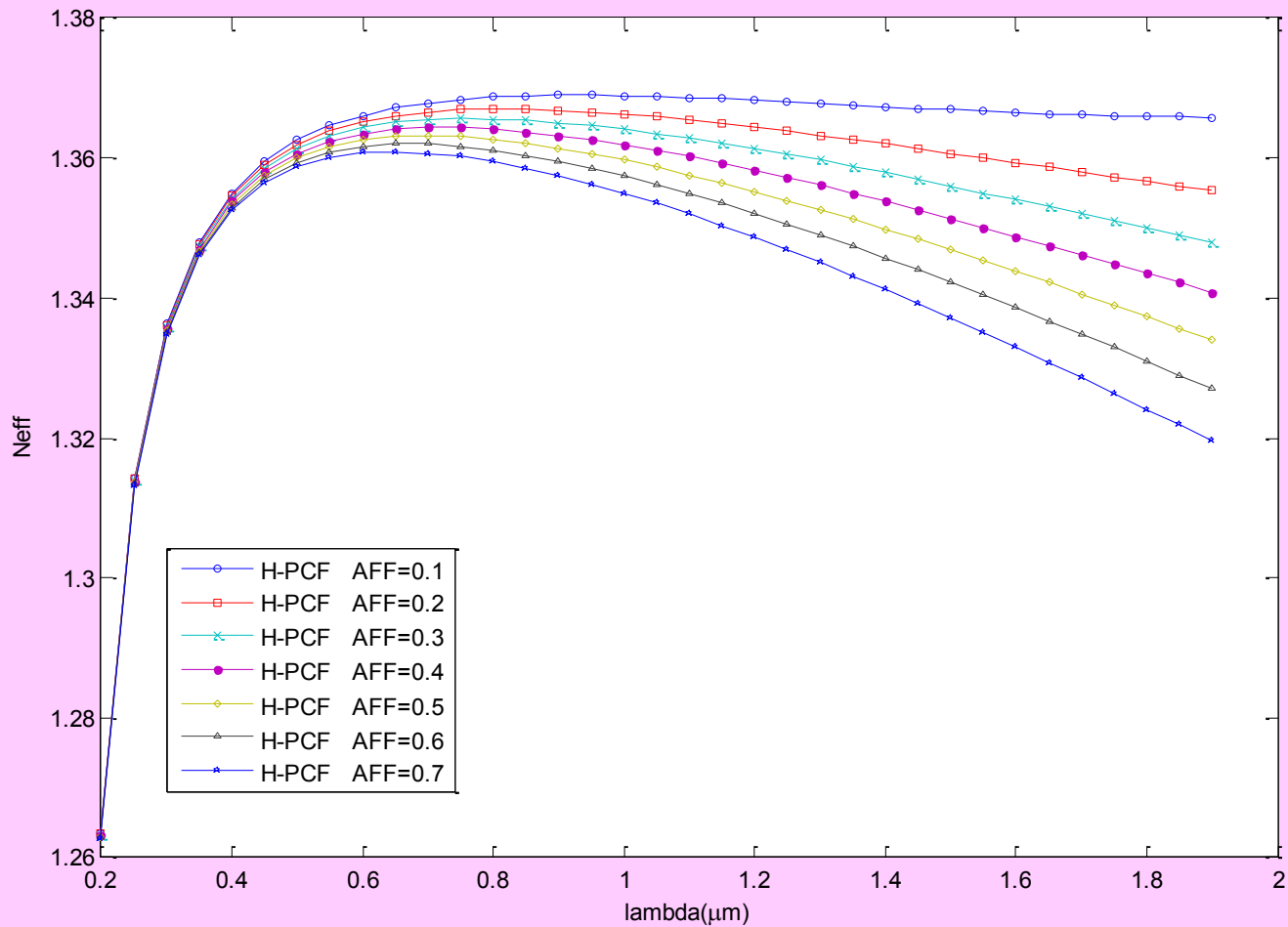
$\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$, $AFR = 0.5$

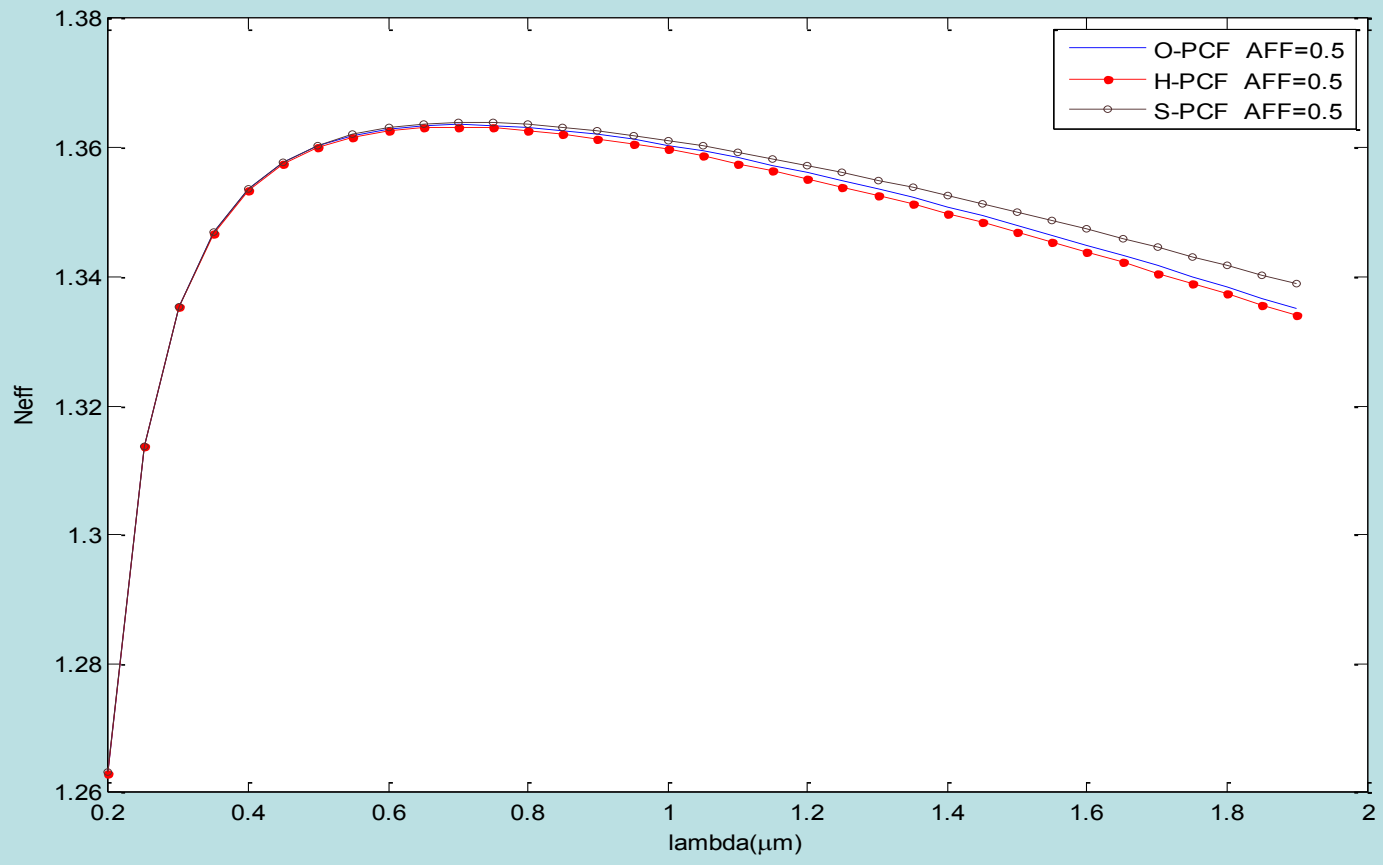


上图的波长为
550nm, 下图的
波长为1550nm



有效传输常数和有效折射率





有效模场面积

$$i(x, y) = \frac{1}{P} \operatorname{Re} \left[\frac{E \times H^*}{2} \cdot \hat{z} \right]$$

$$P = \iint_s \operatorname{Re} \left[\frac{E \times H^*}{2} \cdot \hat{z} \right] dx dy = \iint_s \operatorname{Re} \left[\frac{E_x H_y^* - E_y H_x^*}{2} \right] dx dy$$

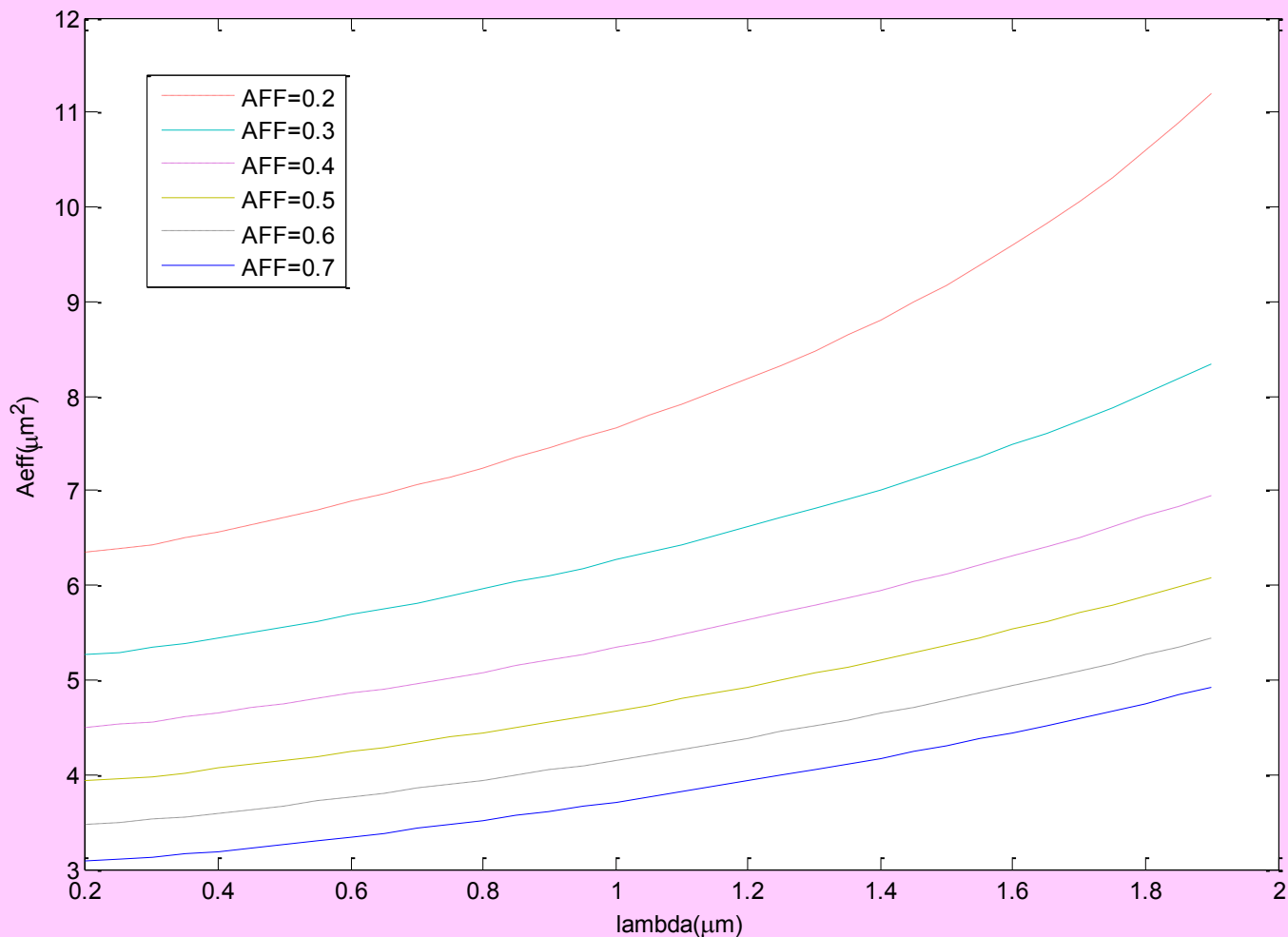
$$A_{\text{eff}} = \frac{1}{\iint_s i^2(x, y) dx dy}$$

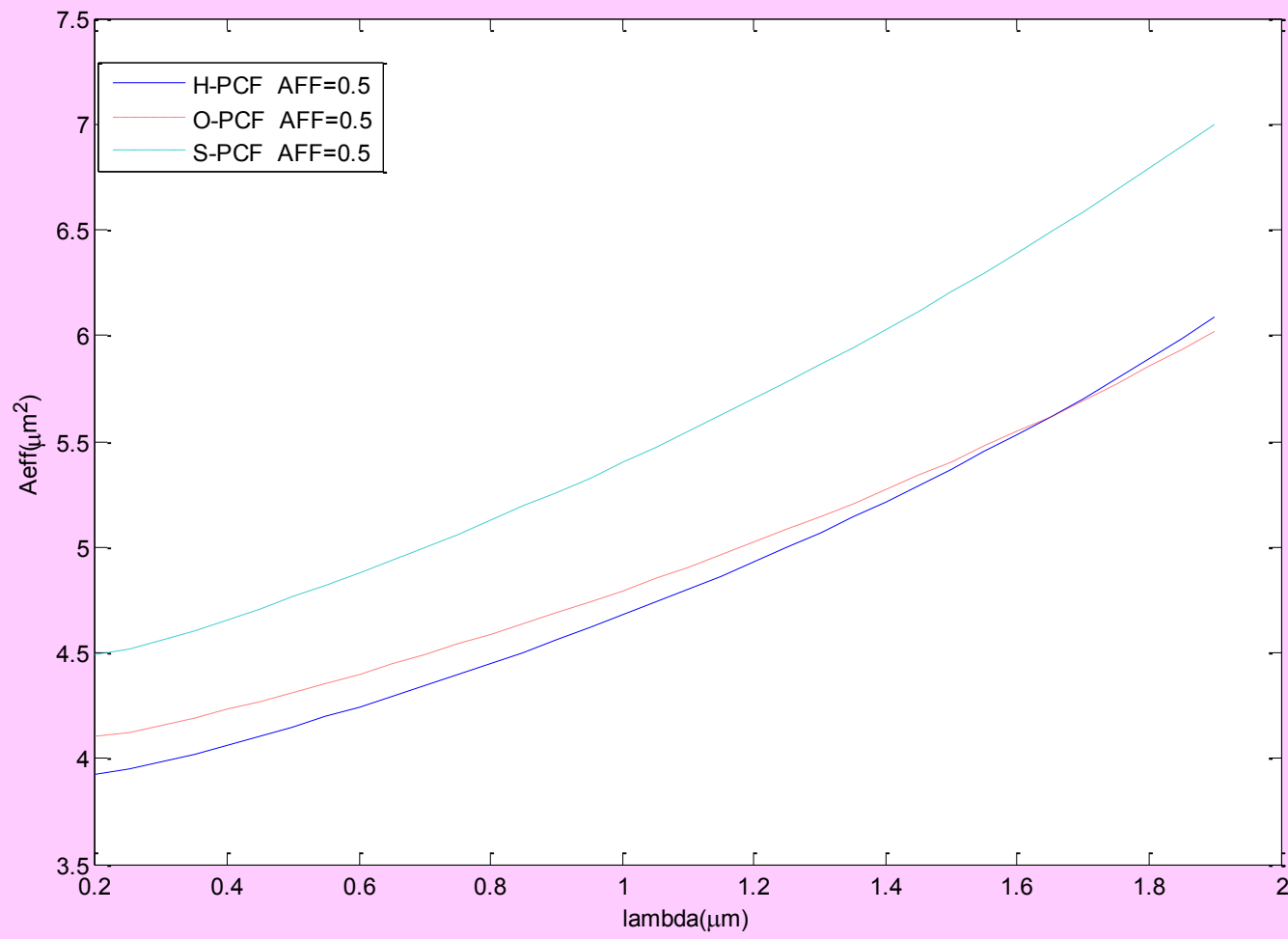
$$A_{\text{eff}} = \frac{(\iint_s E(x, y)^2 dx dy)^2}{\iint_s E(x, y)^4 dx dy}$$

对于基膜的模场分布近似于高斯分布时，可以大致的估算模场的光斑半径。

$$A_{\text{eff}} = \pi \omega^2$$

有效模场面积

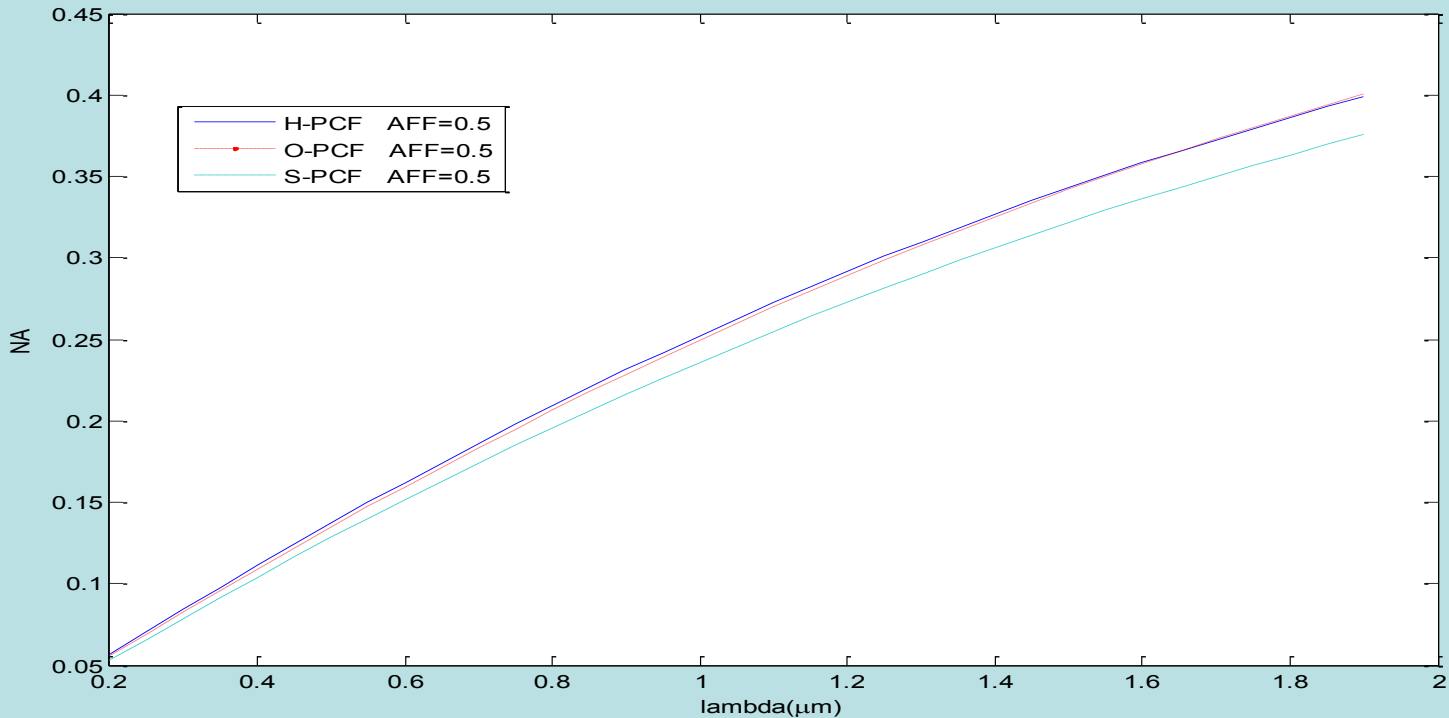




AFF=0.5是H-PCF、O-PCF、S-PCF的基膜的有效模场面积随波长的变化

数值孔径

是入射到光线中的光发生全反射的最大入射角。从上式可以得出相同波长是基膜的有效模场面越大对应的光纤的数值孔径就越小，数值孔径越大就越有利于光耦合到光纤中去。



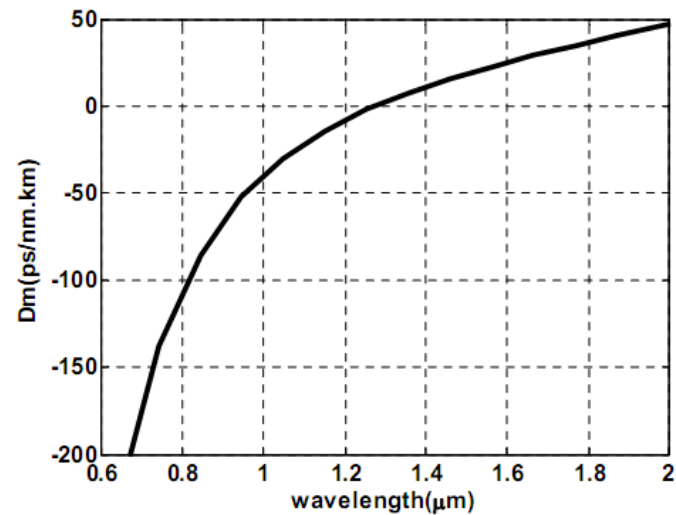
色散和损耗

光子晶体光纤的色散主要由材料色散 D_m 和波导色散 D_w 构成。

一、材料色散

$$n^2 = 1 + \sum \frac{A_i}{\lambda^2 - \lambda_{0i}^2}$$
$$D_m(\lambda) = -\frac{c}{\lambda^2} \frac{dn}{d\lambda}$$

$$A_1 = 0.6961663 \quad \lambda_{01} = 0.0684043$$
$$A_2 = 0.4079426 \quad \lambda_{02} = 0.1162414$$
$$A_3 = 0.8974794 \quad \lambda_{03} = 9.896161$$

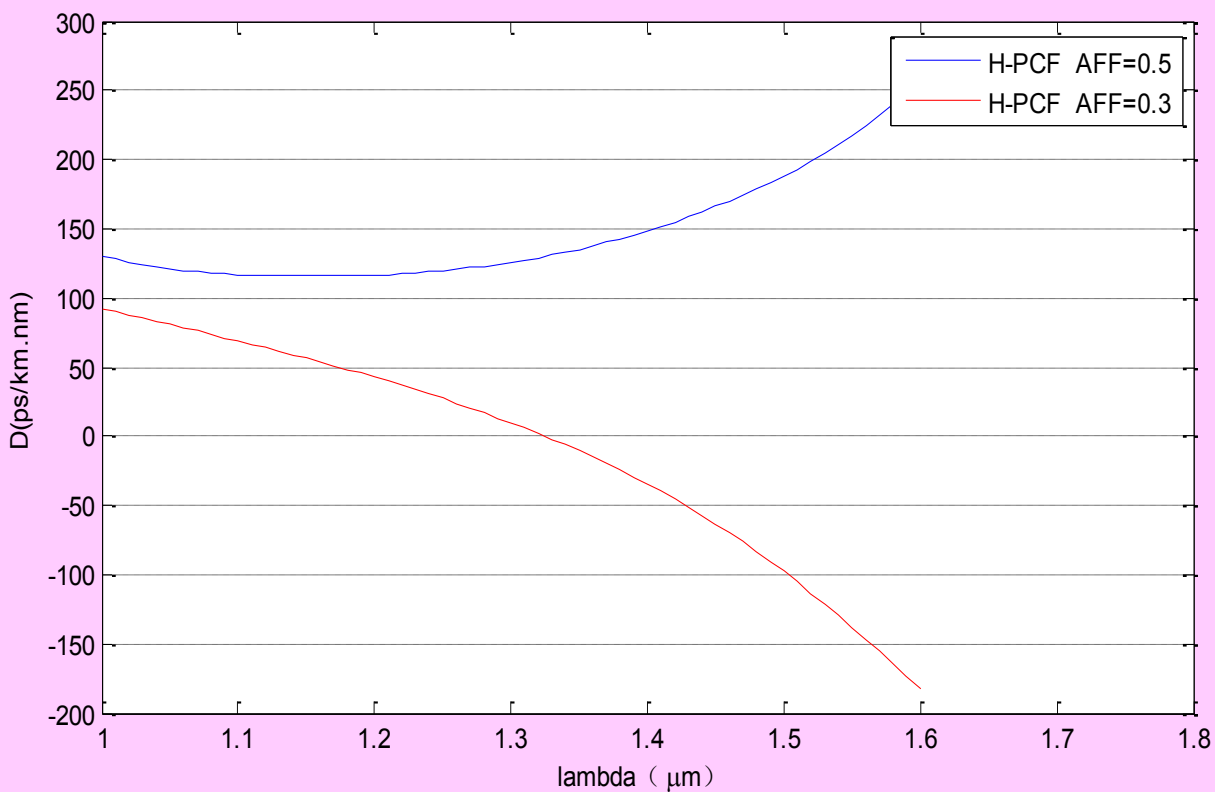


二、波导色散

$$D_w(\lambda) = -\frac{c}{\lambda^2} \frac{d^2 n_{eff}}{d\lambda^2}$$

三、总色散

$$D(\lambda) = D_w(\lambda) + \Gamma(\lambda) D_m(\lambda)$$



损耗

- 光子晶体光纤的损耗

一、本征损耗

$$\alpha_{dB} = A/\lambda^4 + B + \alpha_{OH} + \alpha_{IR}$$

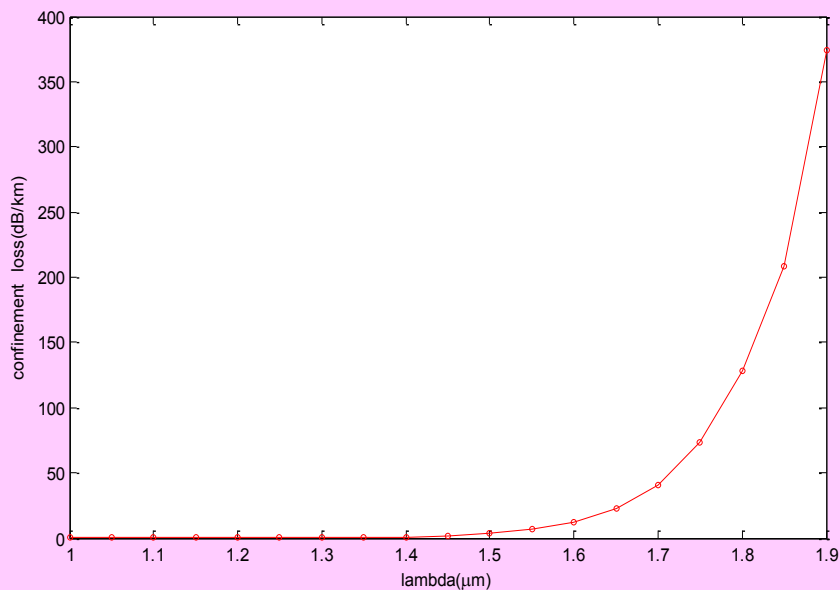
式中A为瑞利散射系数，B为缺陷损耗，OH吸收损耗，红外吸收损耗。现在光子晶体光纤的本征损耗由OH吸收损耗和缺陷损耗主导。对于光子晶体光纤的本征损耗主要取决于制造工艺的改进。

二、泄露损耗

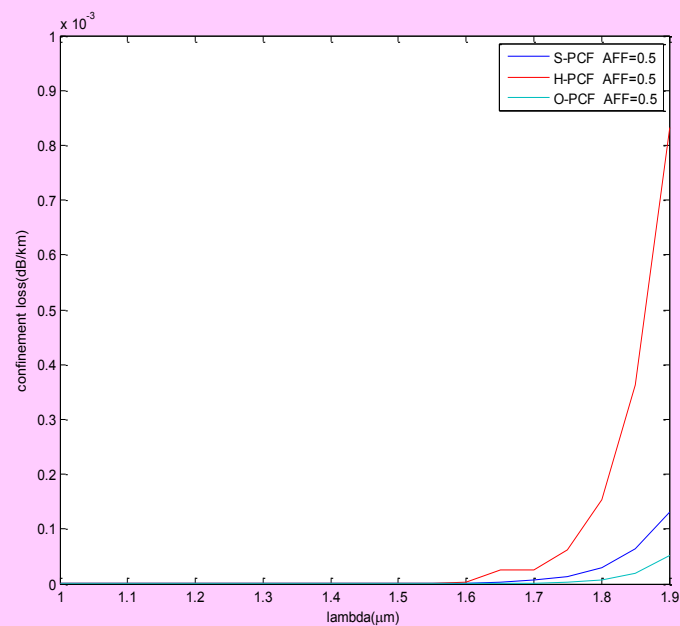
光子晶体光纤的限制损耗是由于光子晶体光纤的截面的可分布空气孔是有限的，所以所有的光子晶体光纤都有限制损耗。

光子晶体光纤的限制损耗

$$CL(\text{dB/km}) = \frac{20}{\ln 10} \times \frac{2\pi}{\lambda} \times 1000 \times \text{Im}(n_{\text{eff}})$$



O-PCF (AFF=0.2) 的限制损耗随波长变化



O-PCF、S-PCF、H-PCF (AFF=0.5) 的限制损耗随波长变化

适用于THz波传输的波导研究

目前THz波导的研究状况

- ✓ **Metallic waveguides**
- ✓ **Dielectric waveguides**

Metallic waveguides

➤ Circular metallic tubes

eg: stainless steel hypodermic needles, propagation loss on the order of **5dB/cm**

➤ Thin metal layers on the inner surface of dielectric tubes

A thin Cu layer in a polystyrene tube (loss **3.9dB/m**)

A thin Ag layer in a silica tube (loss **8.5dB/m**)

➤ Surface plasmon mediated guidance on metallic wires (has the lowest predicted propagation losses of **0.9dB/m**)

Defect:

- It is very difficult to excite the plasmons because their **azimuthal polarization**
- Typical coupling losses are very high with less than **1%** of the incident power transmitted; even with the development of specialized antennas only **50%** coupling is achieved.
- Since the mode extends many times the diameter of the wire into the ambient air, these waveguides have serious cross-talk issues with nearby metallic objects.

Dielectric waveguides

Because of the high absorption losses in dielectrics, a variety of Guiding mechanisms have been studied in order to reduce the Propagation losses.

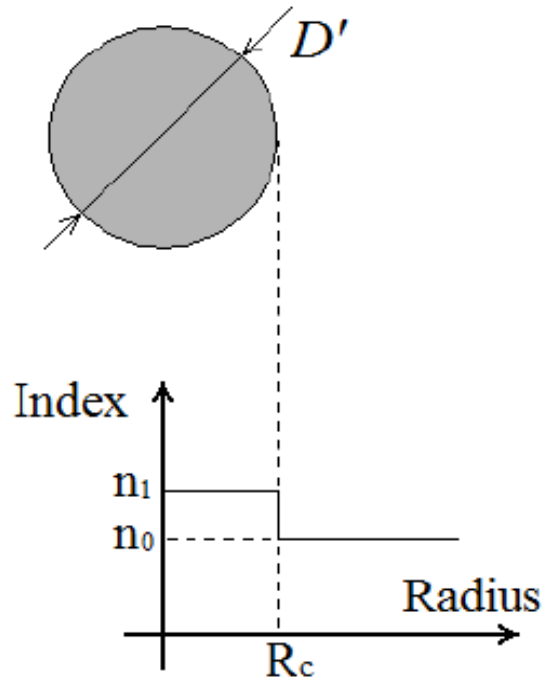
- The resonance in the dielectric constant of ferroelectric PVDF has been exploited for demonstrating a hollow core $n < 1$ waveguide with losses lower than 10dB/m.

Defect: PVDF is a semi-crystalline polymer that has many phases and a complicated poling procedure is required for achieving the ferroelectric state.

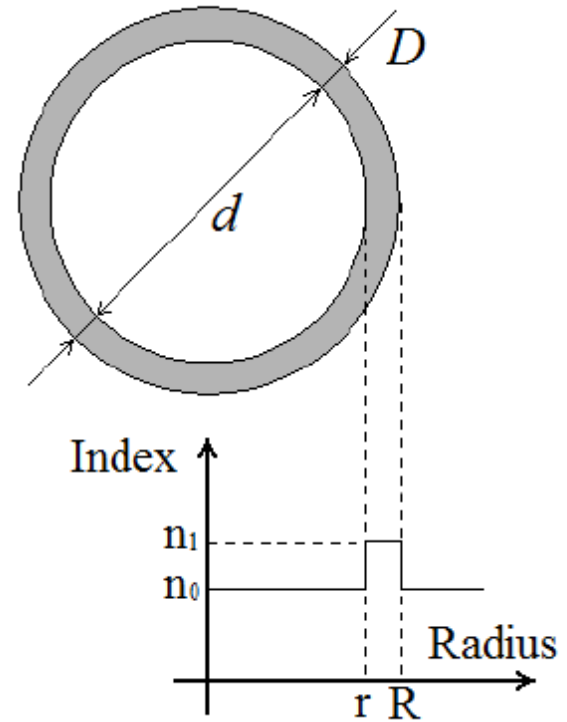
- Different photonic crystal structures have been tried, but the absorption in a solid core remains considerable.
- Many sub-wavelength waveguides have developed(下文详说)

sub-wavelength waveguides

- ♣ A solid subwavelength rod acts as high refractive index core with the surrounding air acting as a lower refractive index cladding. The field of the guided mode extends far into the surrounding air resulting in low absorption loss.
- ♣ A polymer tube with a cross section of ring structure. Low-loss property of the polymer tube for THz guiding is achieved due to the air core inside the polymer tube which traps a large part of mode power and ,at the same time, enlarge the mode area of the fundamental mode.



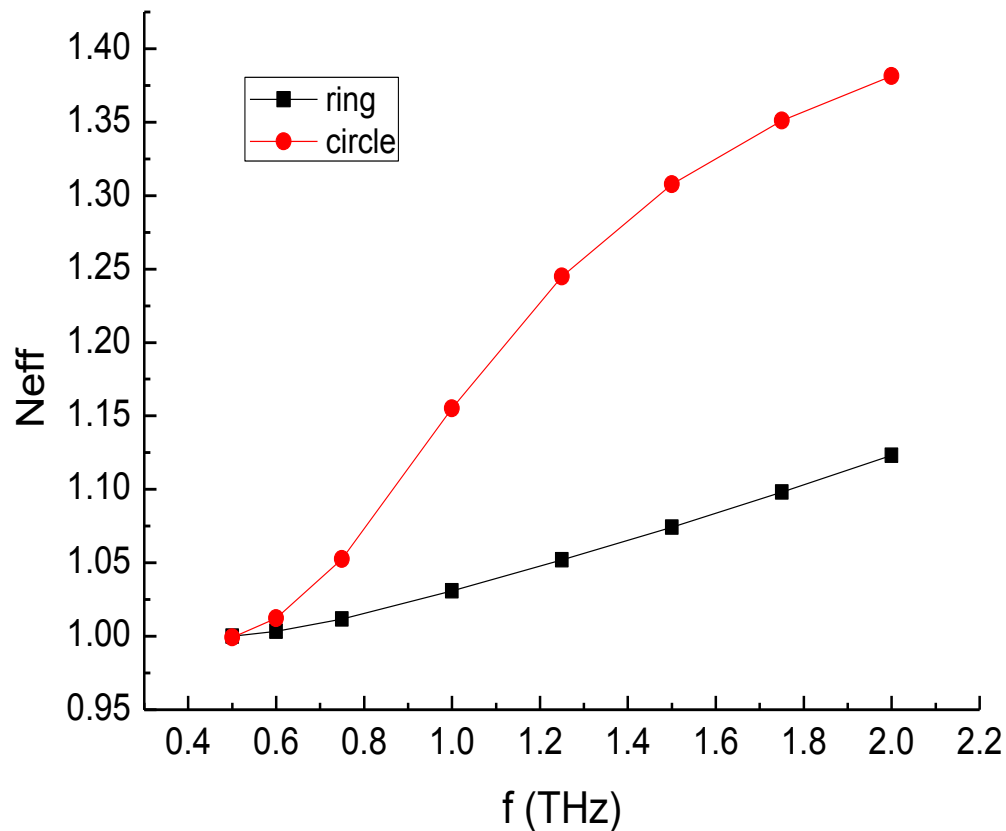
$D'=165.8312 \mu\text{m}$
 $n_1=1.5, n_0=1$



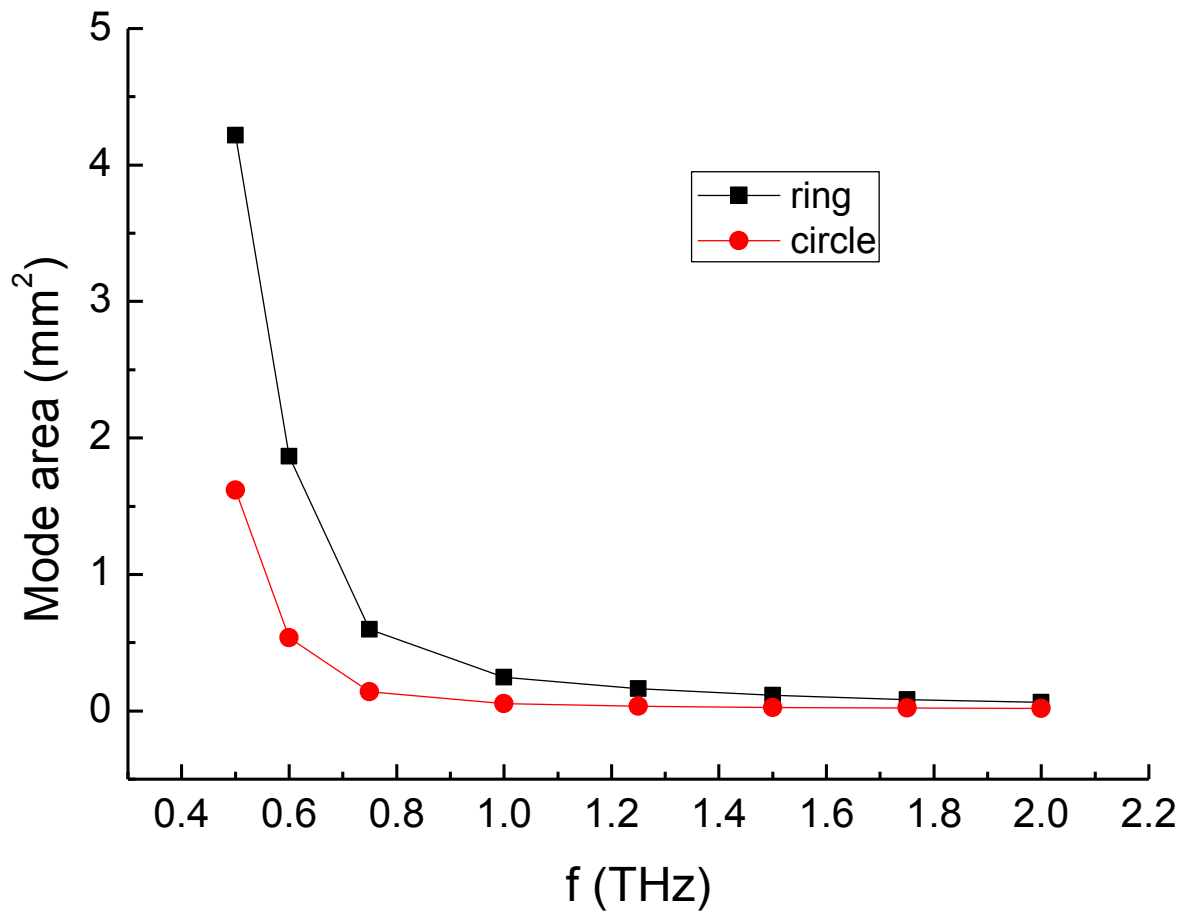
$D=250 \mu\text{m}, D=300 \mu\text{m}$
 $n_1=1.5, n_0=1$

注：横截面图上，聚合物实心光纤和聚合物管具有相同的材料面积

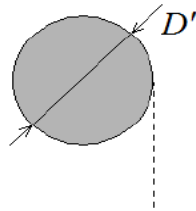
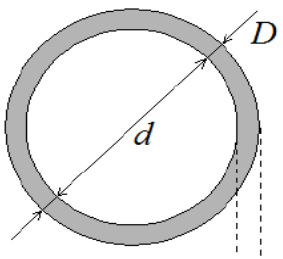
对其进行的相关仿真结果



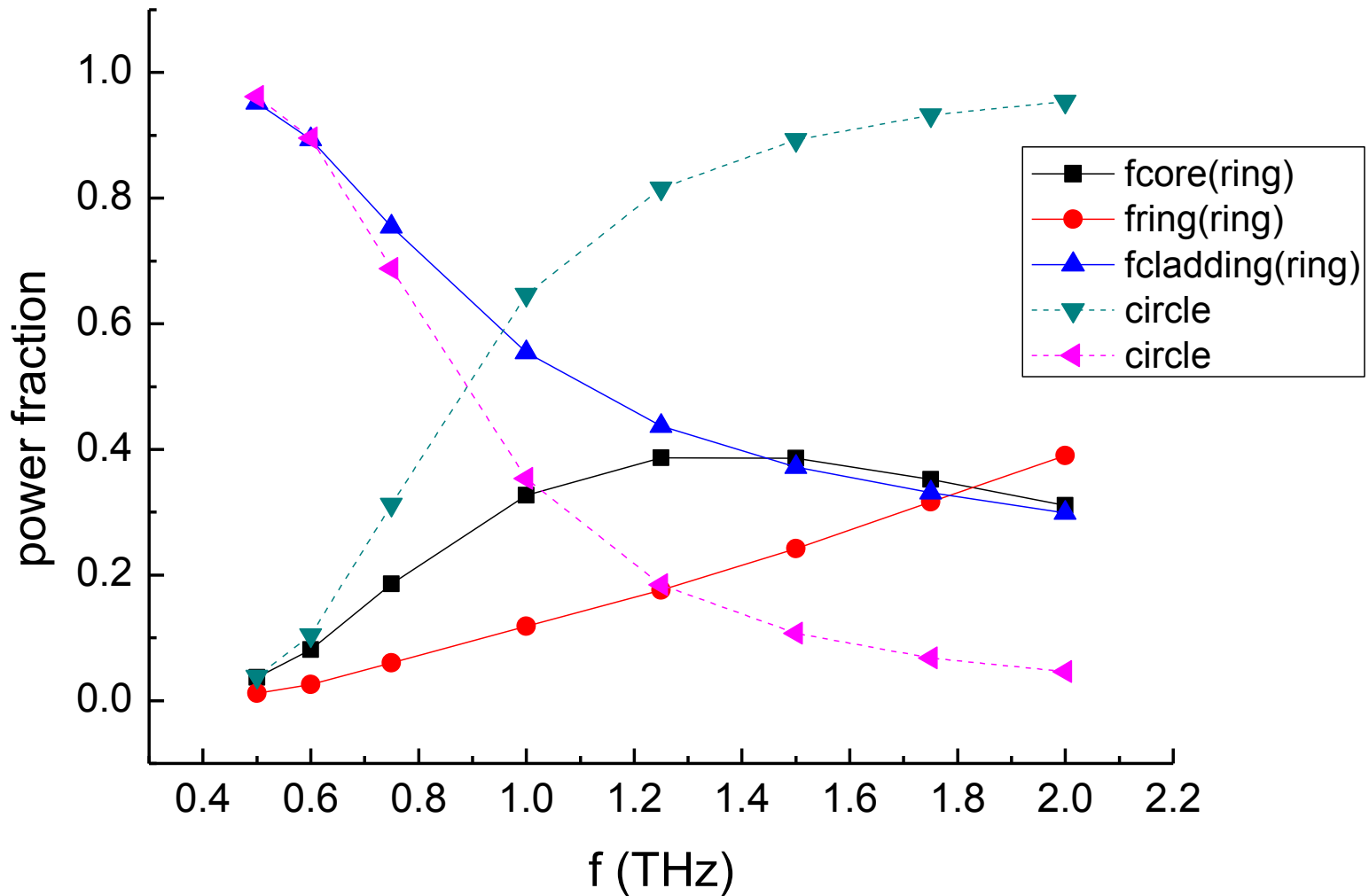
基模有效折射率随着频率的变化



基模的模式面积随着频率的变化

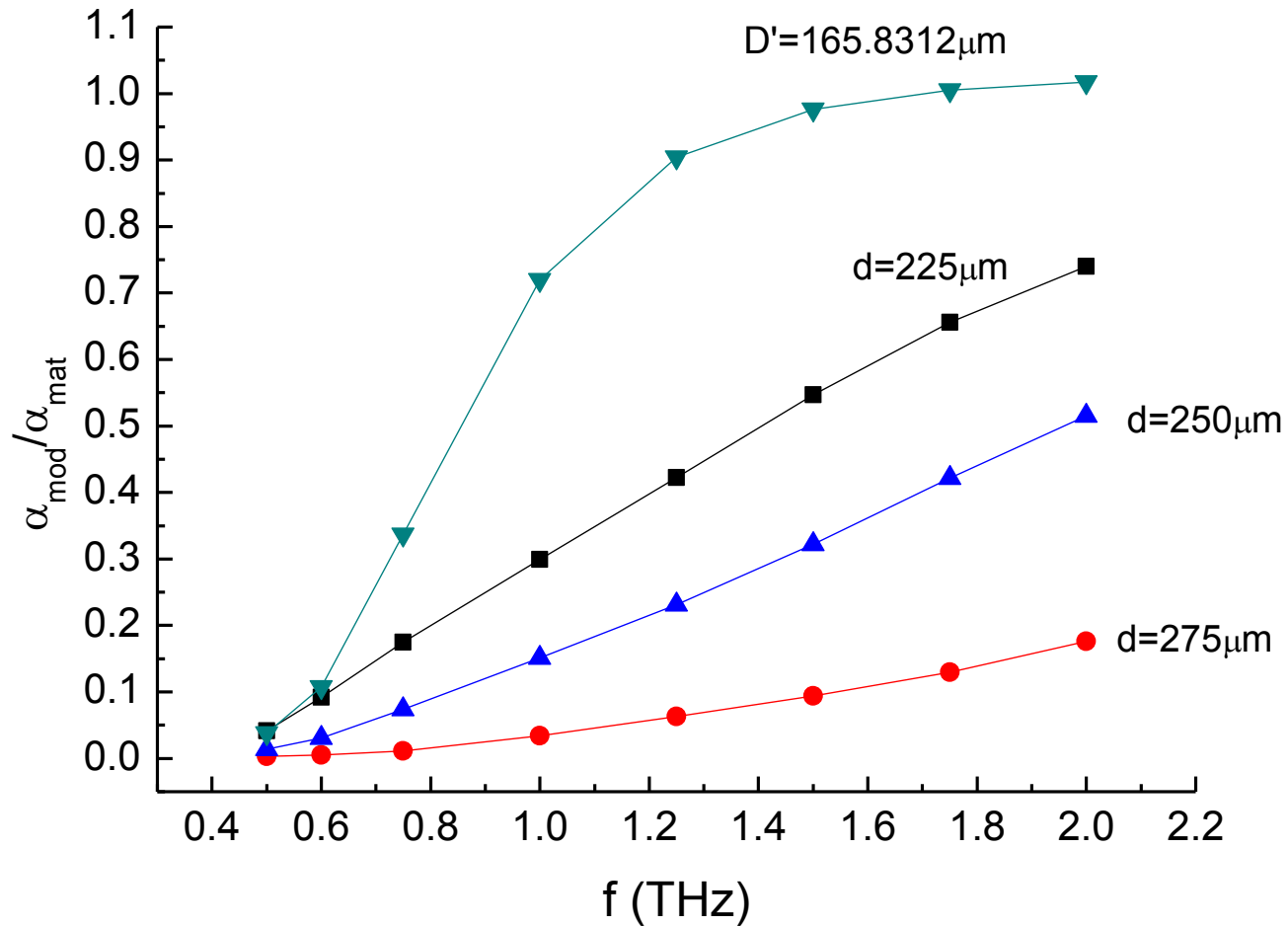


$$f_i = \int_i S_z dA / \int_{All} S_z dA$$

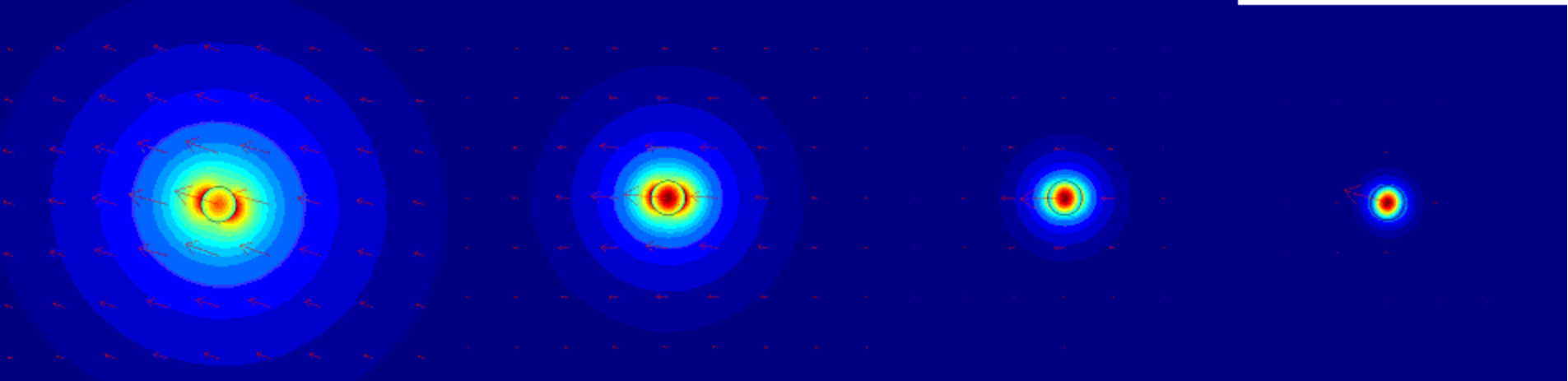


各部分功率分布随着频率的变化

$$\frac{\alpha_{\text{mod}}}{\alpha_{\text{mat}}} = \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{1/2} n \int_{\text{polymer}} |E|^2 dA / \text{Re} \left\{ \hat{z} \int_{\text{All}} \vec{E} \times \vec{H}^* dA \right\}$$



相对吸收损耗随着频率的变化



$f=0.5\text{THz}(600\ \mu\text{m})$

$f=0.6\text{THz}(500\ \mu\text{m})$

$f=0.75\text{THz}(400\ \mu\text{m})$

$f=1\text{THz}(300\ \mu\text{m})$



$f=1.25\text{THz}(240\ \mu\text{m})$

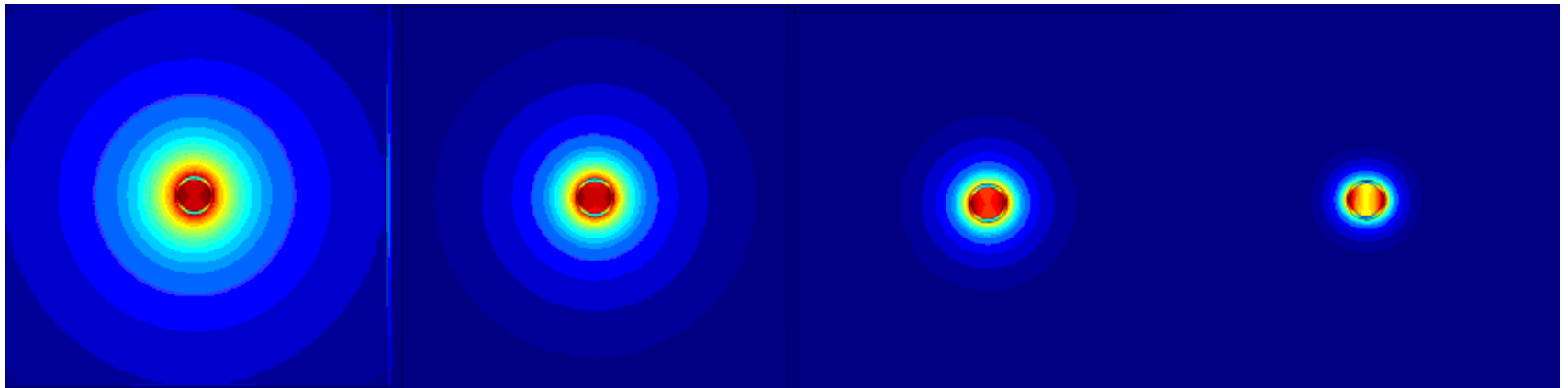
$f=1.5\text{THz}(200\ \mu\text{m})$

$f=1.75\text{THz}(171\ \mu\text{m})$

$f=2\text{THz}(150\ \mu\text{m})$

圆形结构功率流随频率 f 的变化($d=165.8312\ \mu\text{m}$)

结论: 对于大的光纤直径 ($d \geq$ 波长), **THz microwire**大部分的导模功率限制在实芯内
对于 $d \ll$ 波长, 大部分功率集中在空气包层内



$f=0.5\text{THz}$

$f=0.6\text{THz}$

$f=0.75\text{THz}$

$f=1\text{THz}$



$f=1.25\text{THz}$

$f=1.5\text{THz}$

$f=1.75\text{THz}$

$f=2\text{THz}$

环形结构功率流随频率 f 的变化

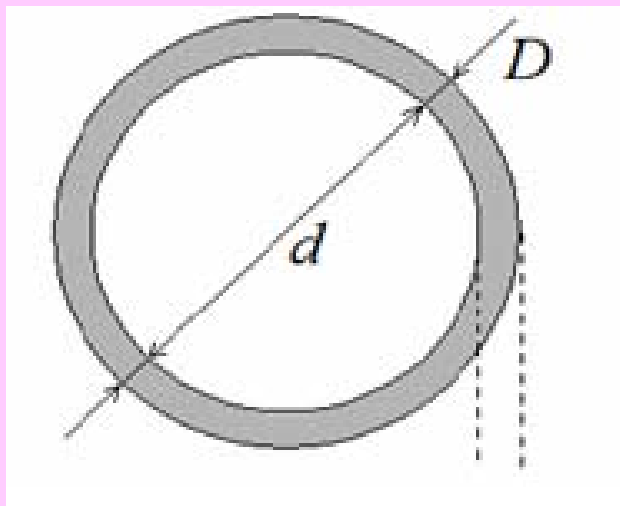
环形结构

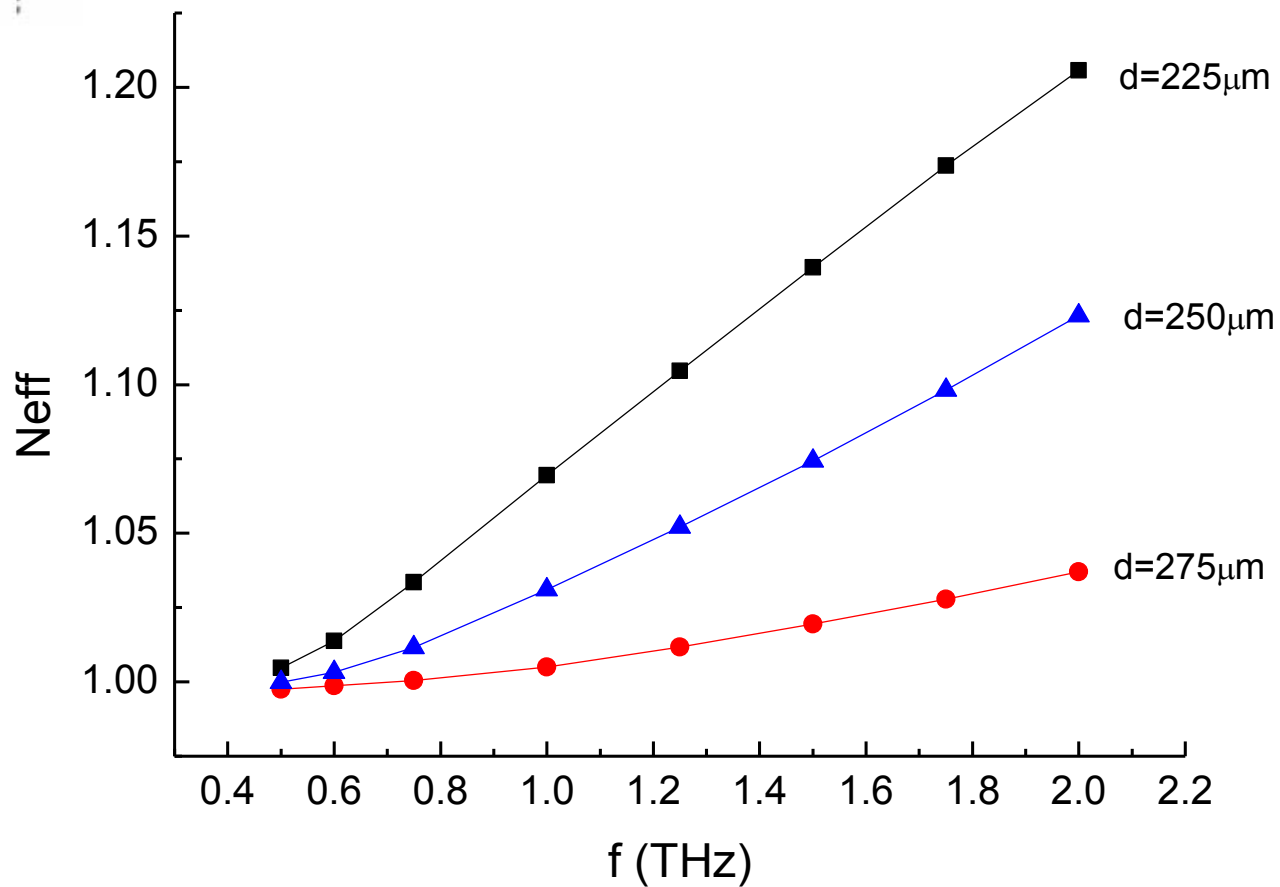
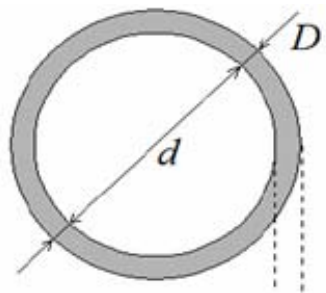
讨论：

外直径保持 $D=300\ \mu\text{m}$ 不变

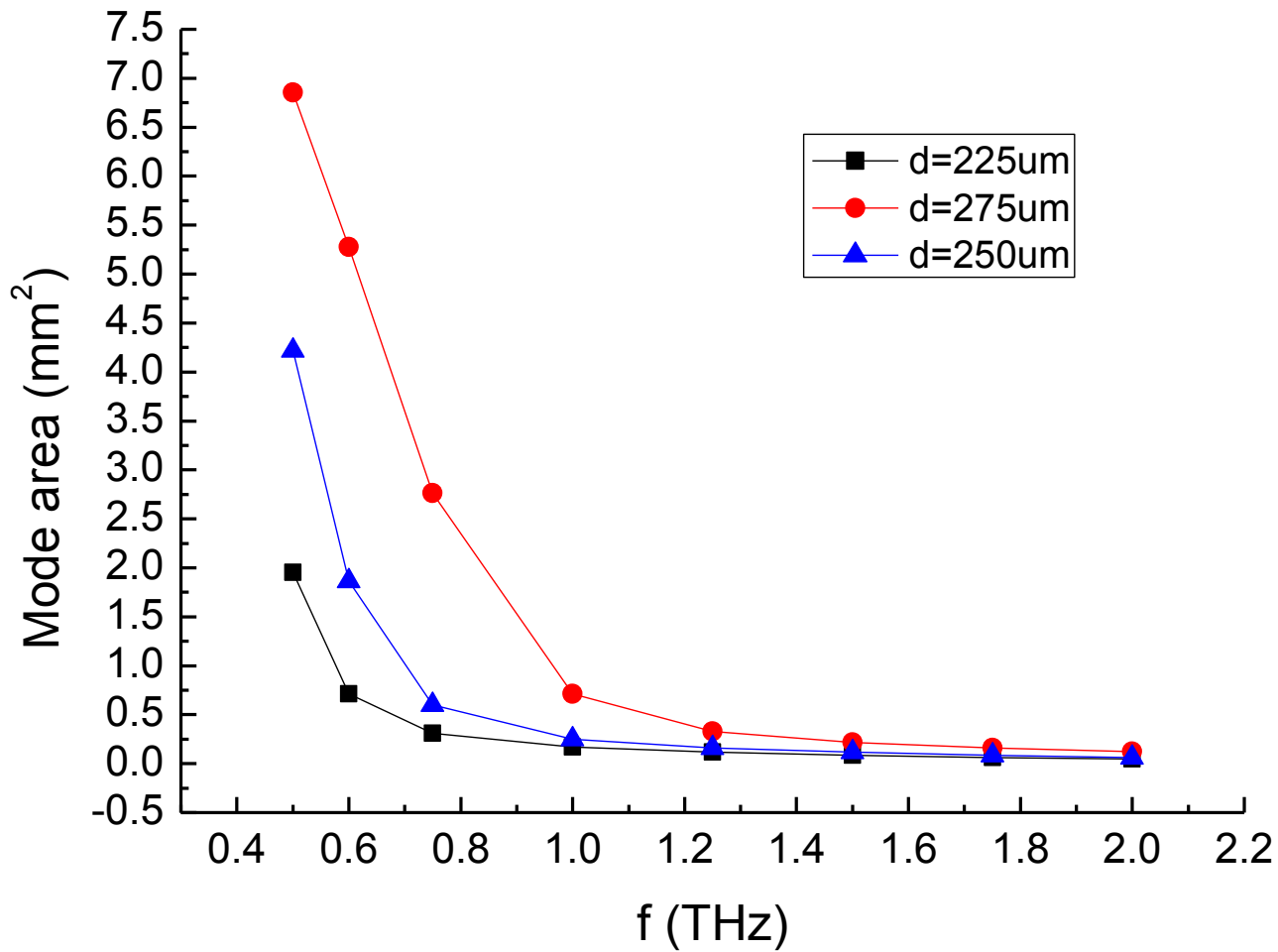
内半径 $d=225\ \mu\text{m}$ ， $d=250\ \mu\text{m}$ ， $d=275\ \mu\text{m}$

观察其变化

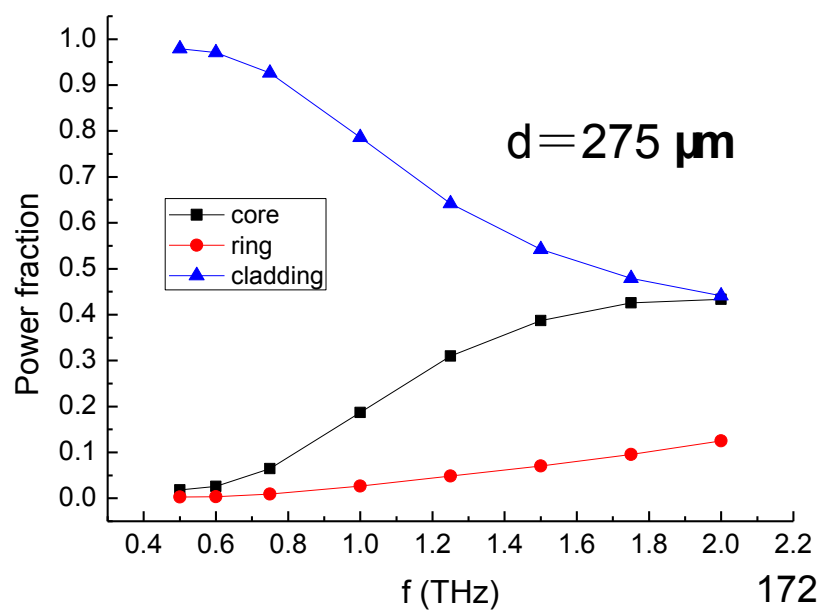
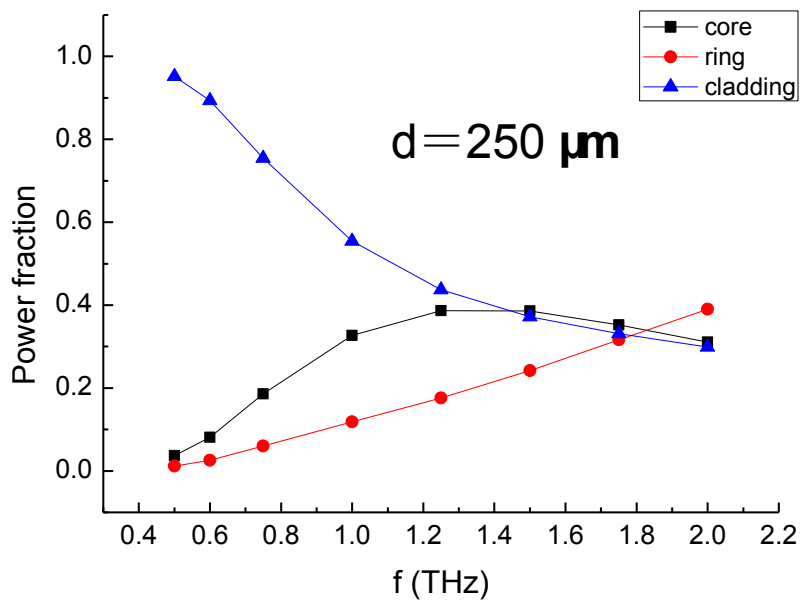
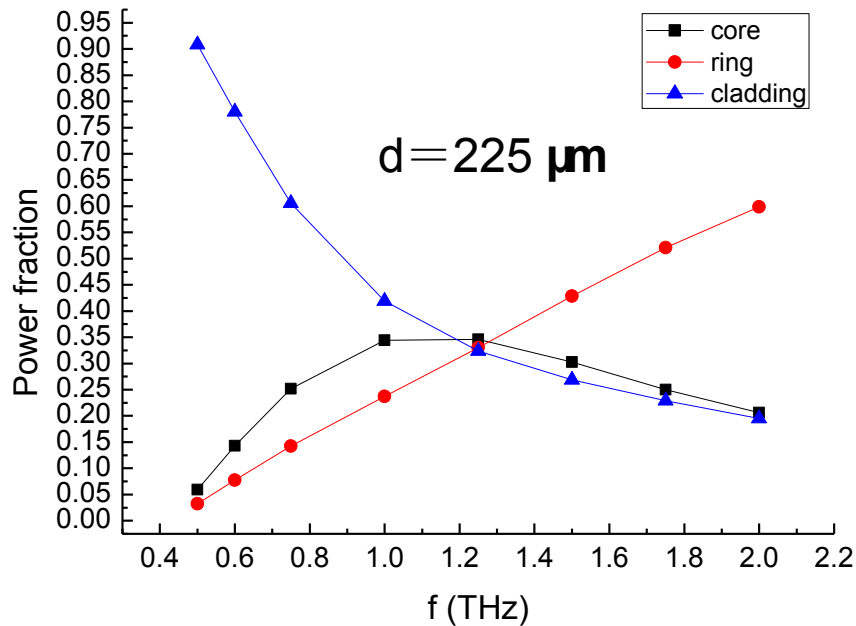




基模有效折射率随着频率的变化



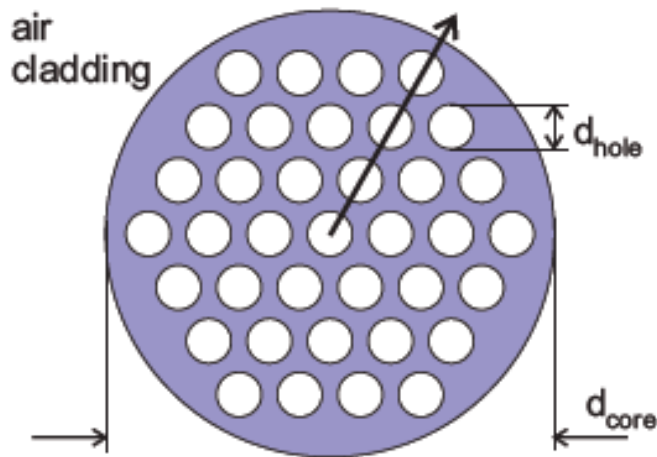
基模的模式面积随着频率的变化



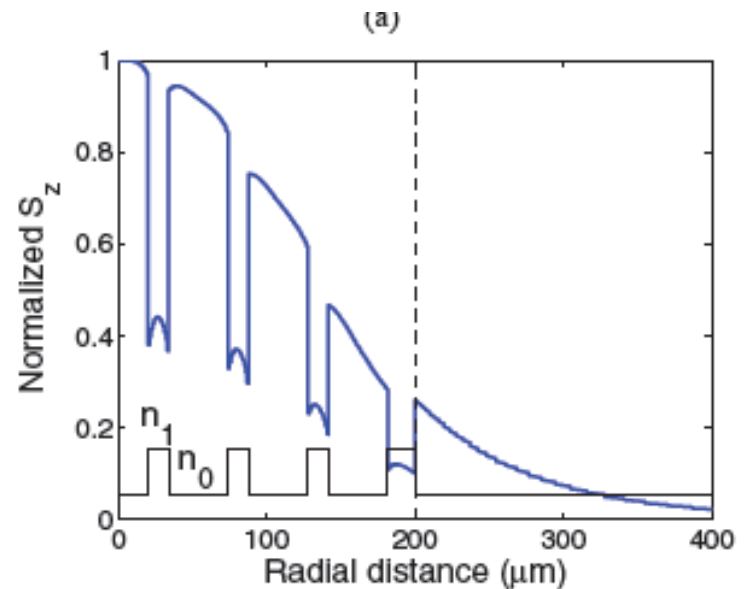
sub-wavelength waveguides

♣ Porous waveguide

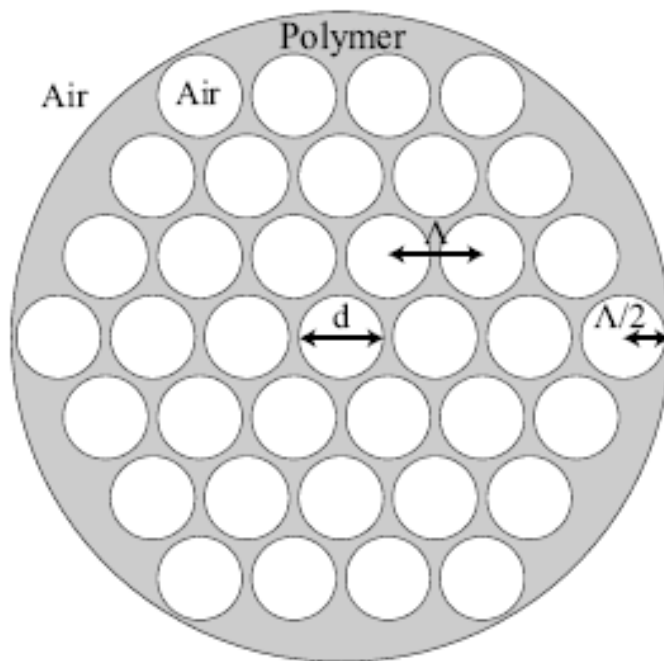
Sub-wavelength with multiple sub-wavelength holes



(a)



导光机理: TIR; 设计多层亚波长孔排列是为了增加在空气中传导的功率, 降低损耗 (认为: THz在干空气中损耗特别小, 可以忽略); 弯曲损耗相对前面的实芯柱结构要小的多

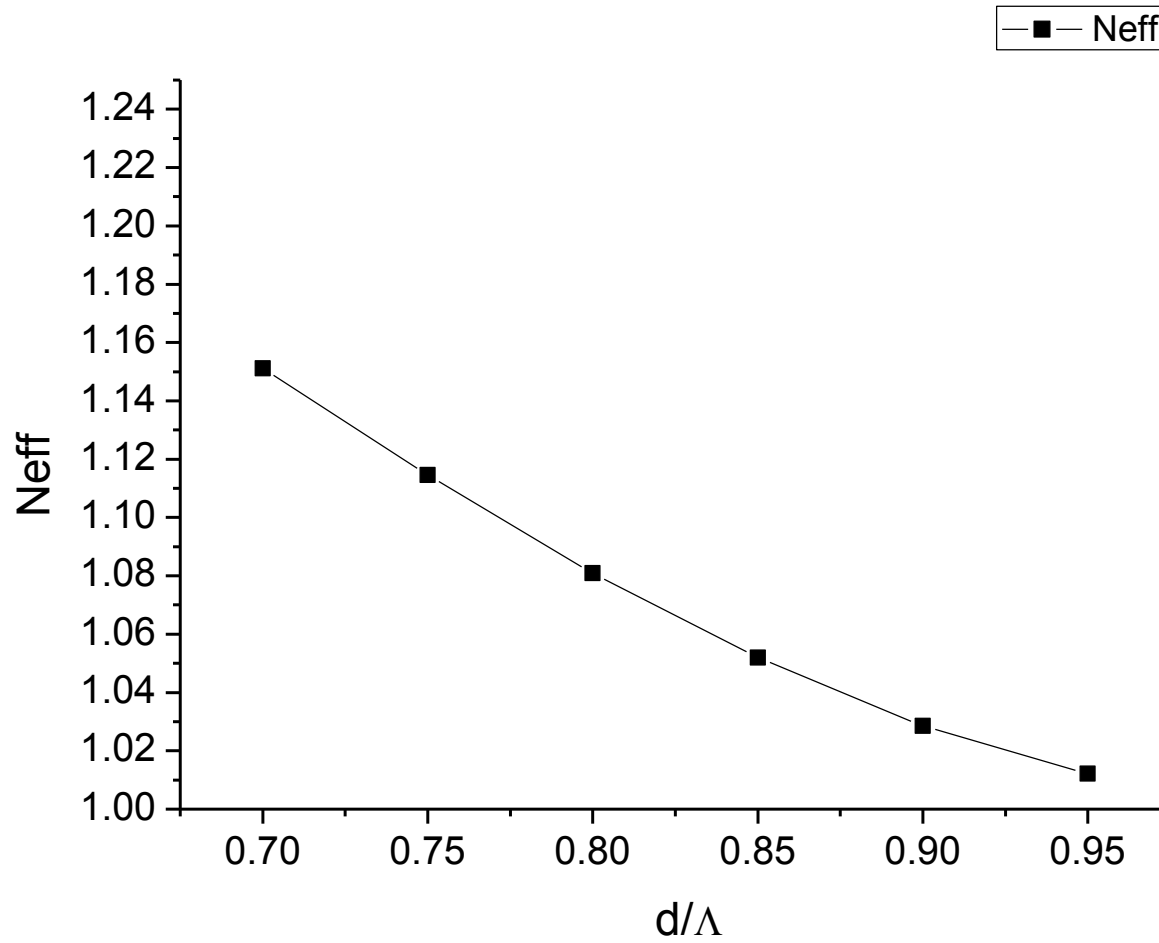


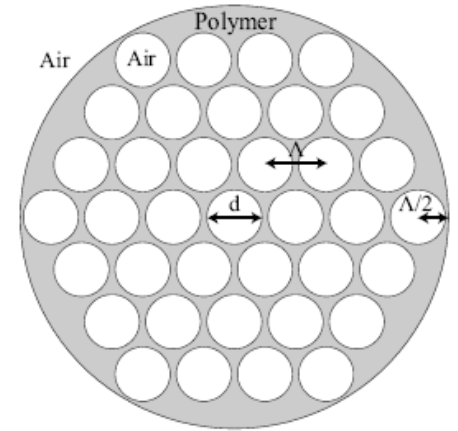
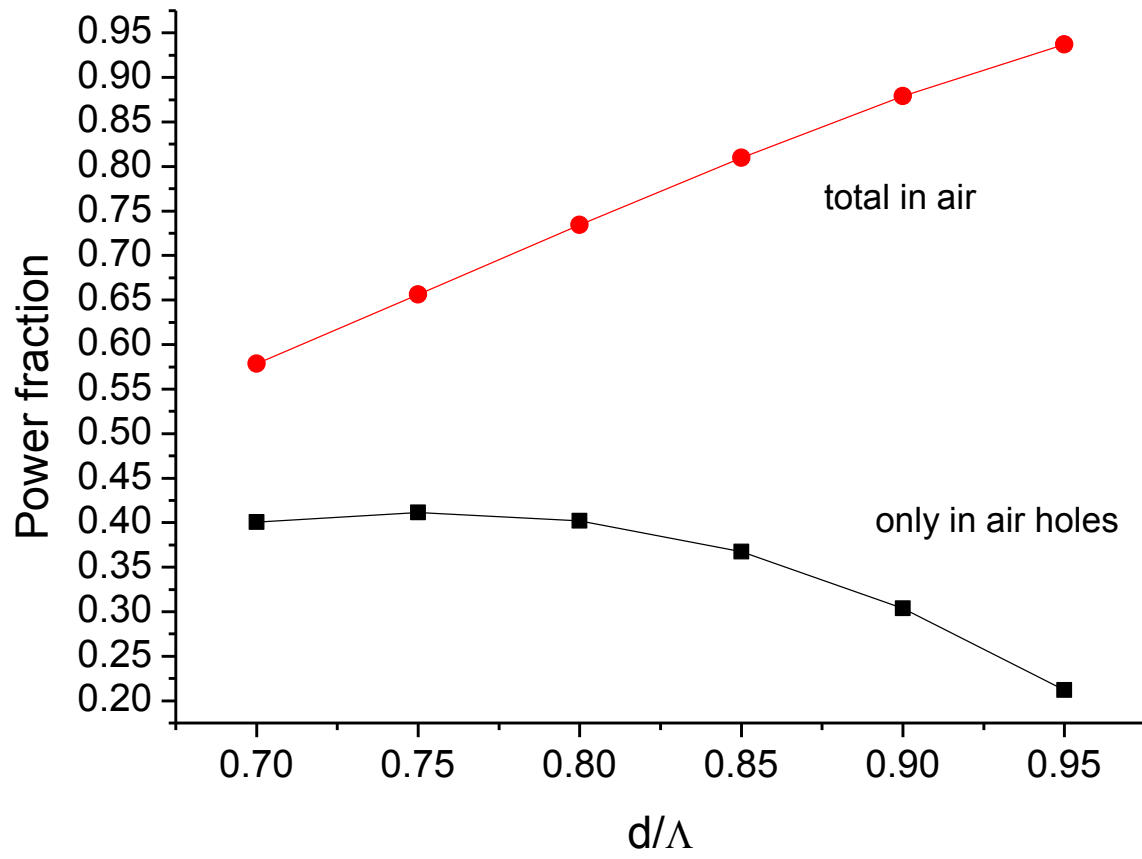
仿真参数如下：

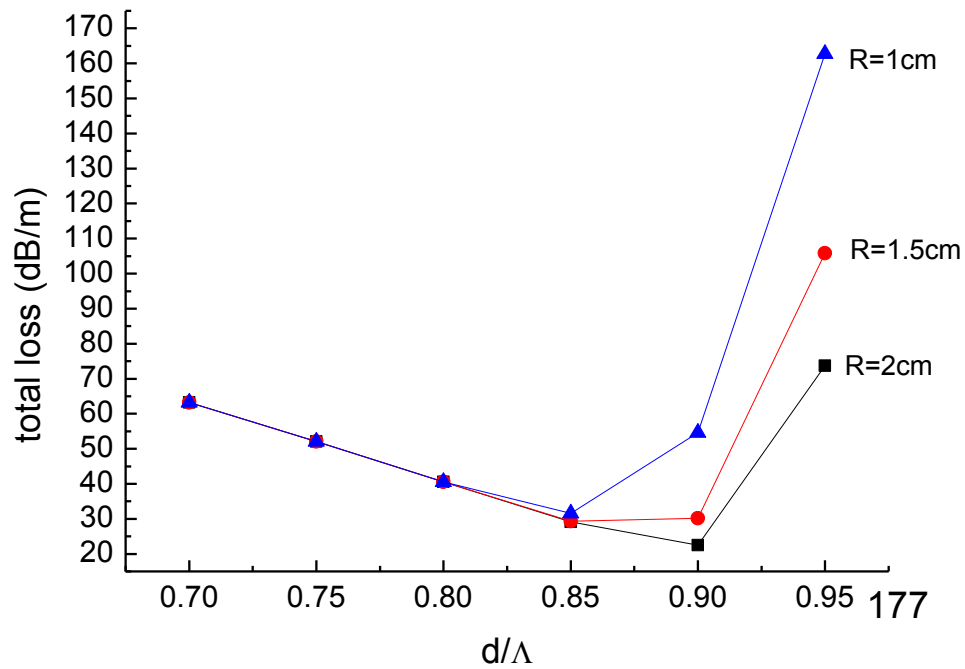
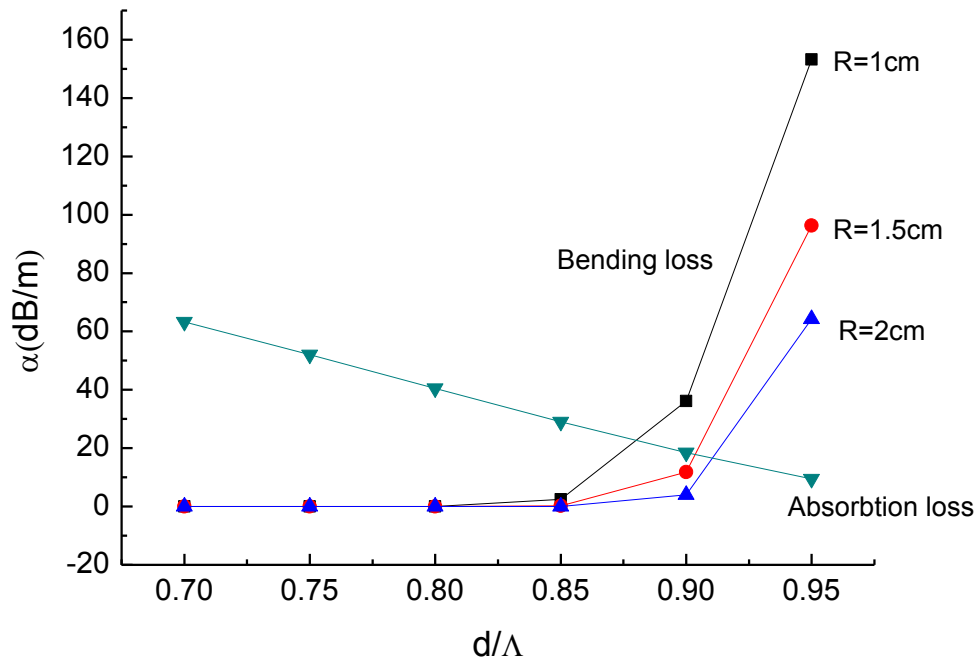
计算三层

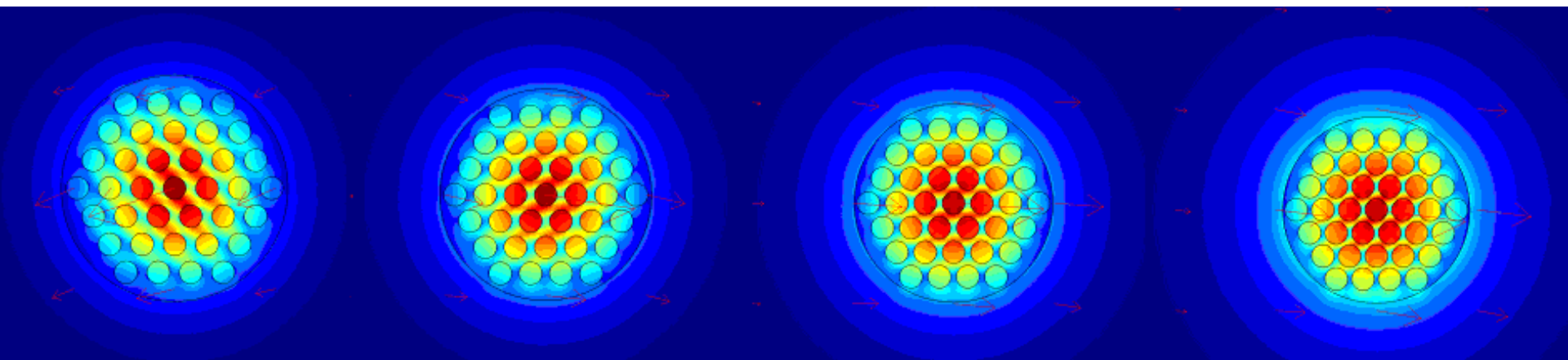
$$\lambda = 300\mu\text{m}, n_1 = 1.5, n_2 = 1, \frac{d}{\lambda} = 0.1$$

$$D_{\text{core}} = 7\Lambda$$







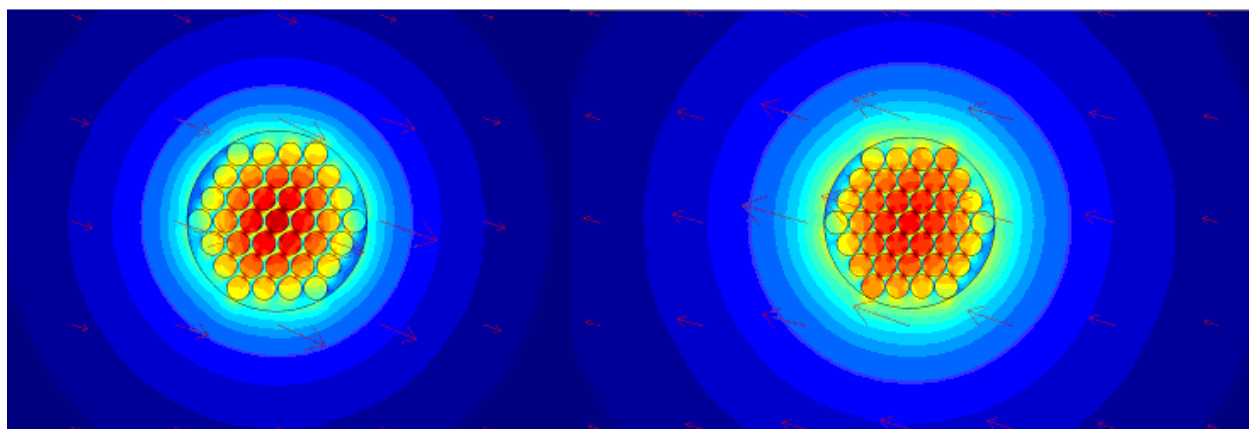


$$\frac{d}{\Lambda} = 0.7$$

$$\frac{d}{\Lambda} = 0.75$$

$$\frac{d}{\Lambda} = 0.8$$

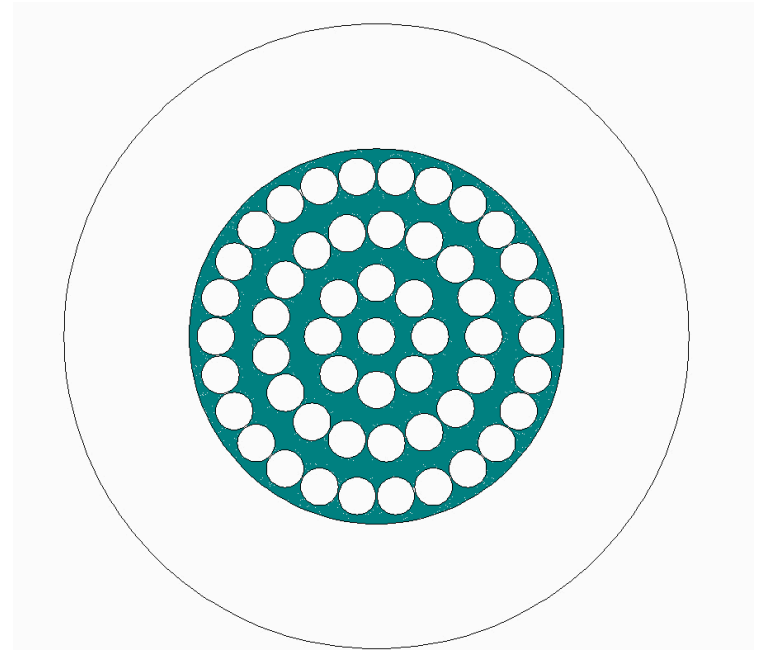
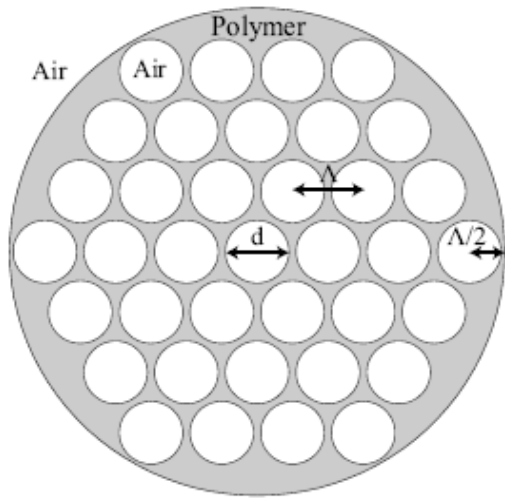
$$\frac{d}{\Lambda} = 0.85$$



$$\frac{d}{\Lambda} = 0.9$$

$$\frac{d}{\Lambda} = 0.95$$

尝试一种新结构



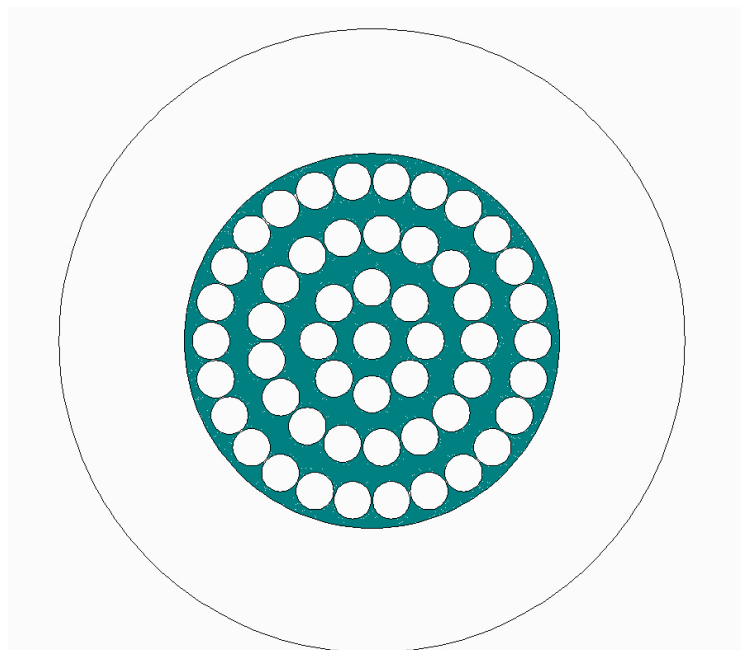
先画好一行四列，这个一行四列类似于上面讨论的 $d/\Lambda=0.7\sim 0.95$ 所不同的是分别将这个圆形进行环绕 尽可能多 不要重叠

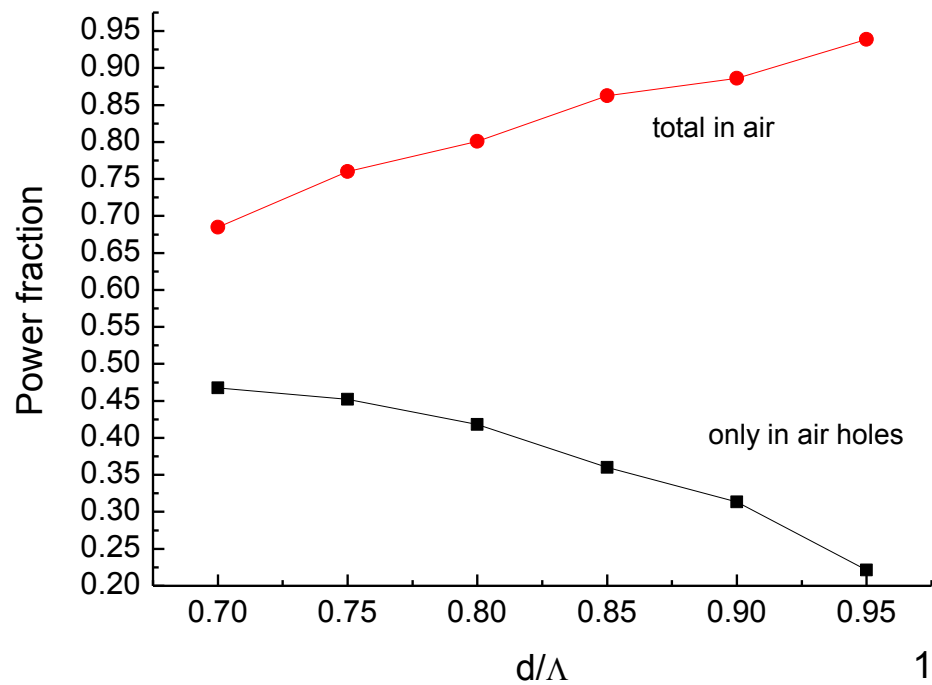
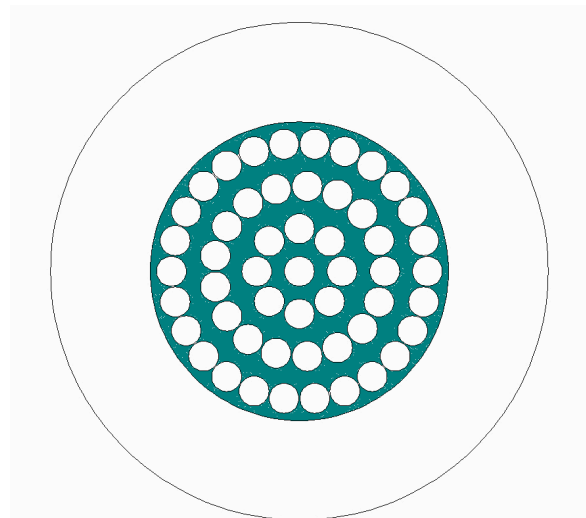
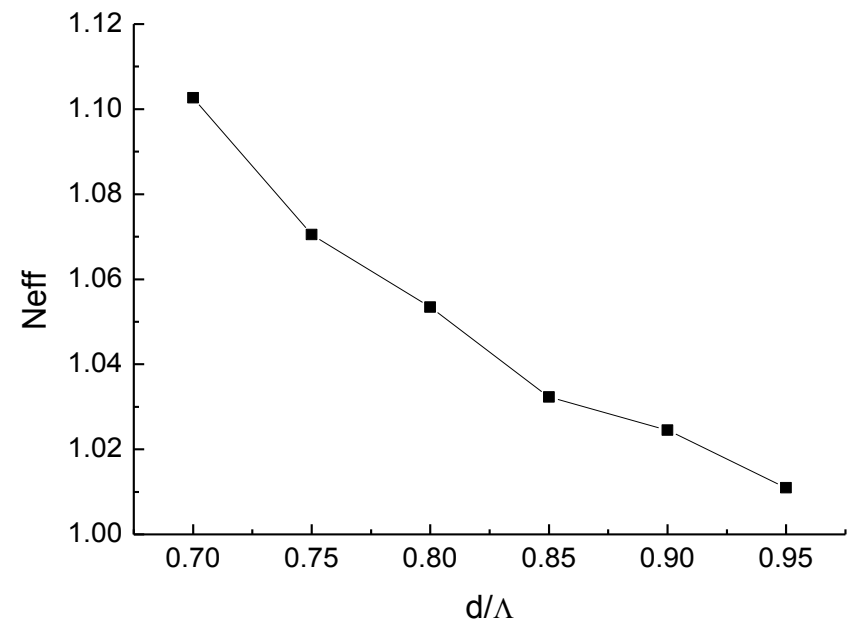
仿真参数如下：

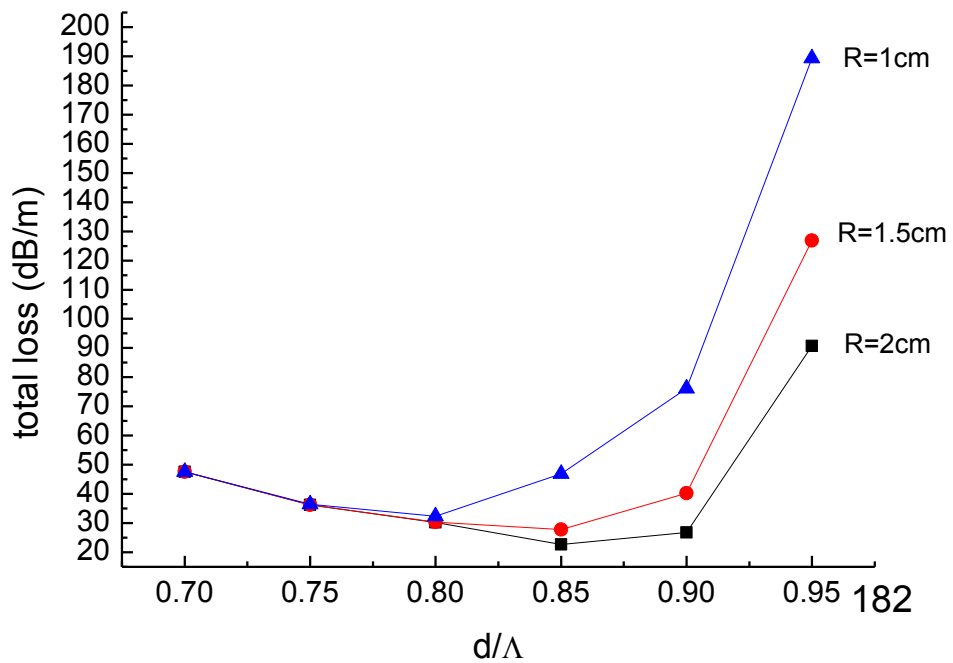
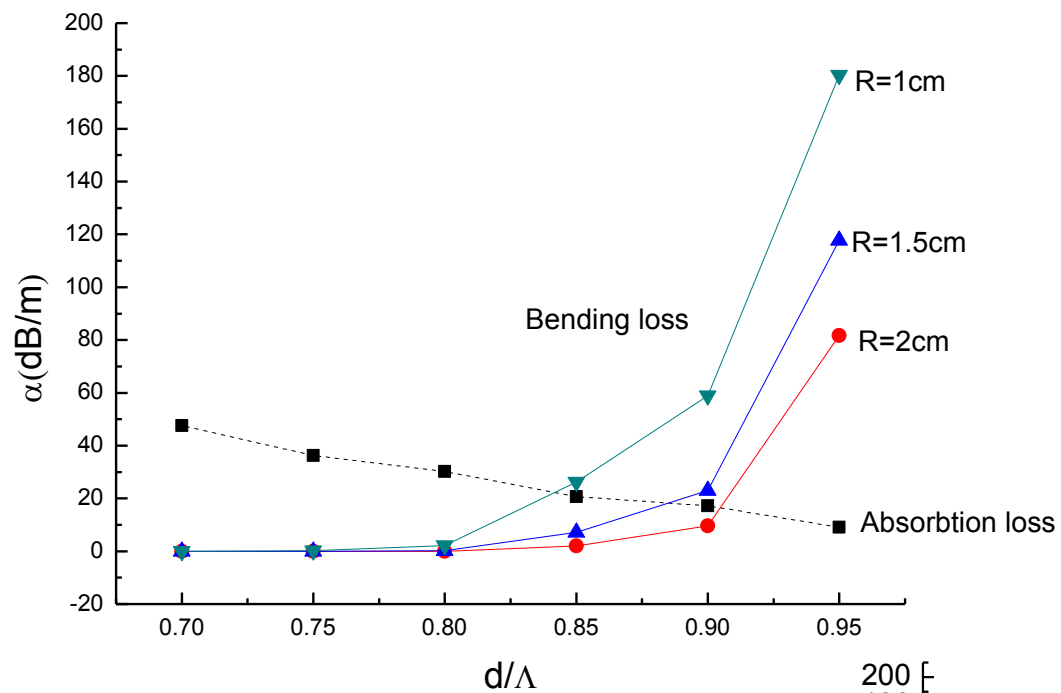
计算三层

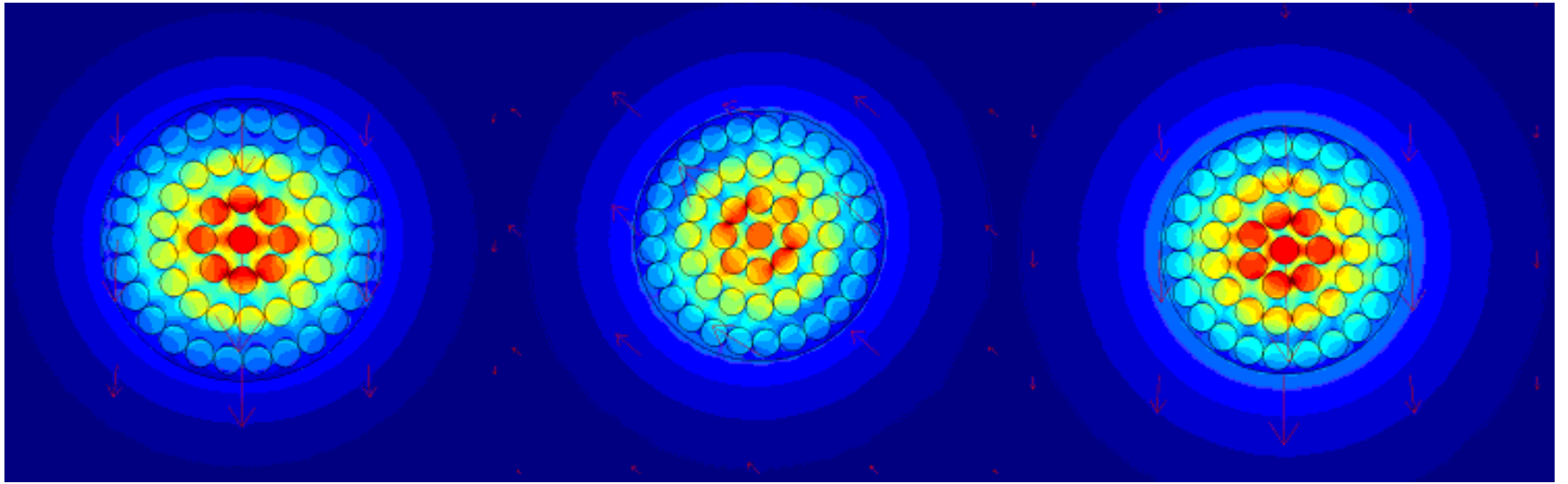
$$\lambda = 300\mu\text{m}, n_1 = 1.5, n_2 = 1, \frac{d}{\lambda} = 0.1$$

$$D_{core} = 7\Lambda$$





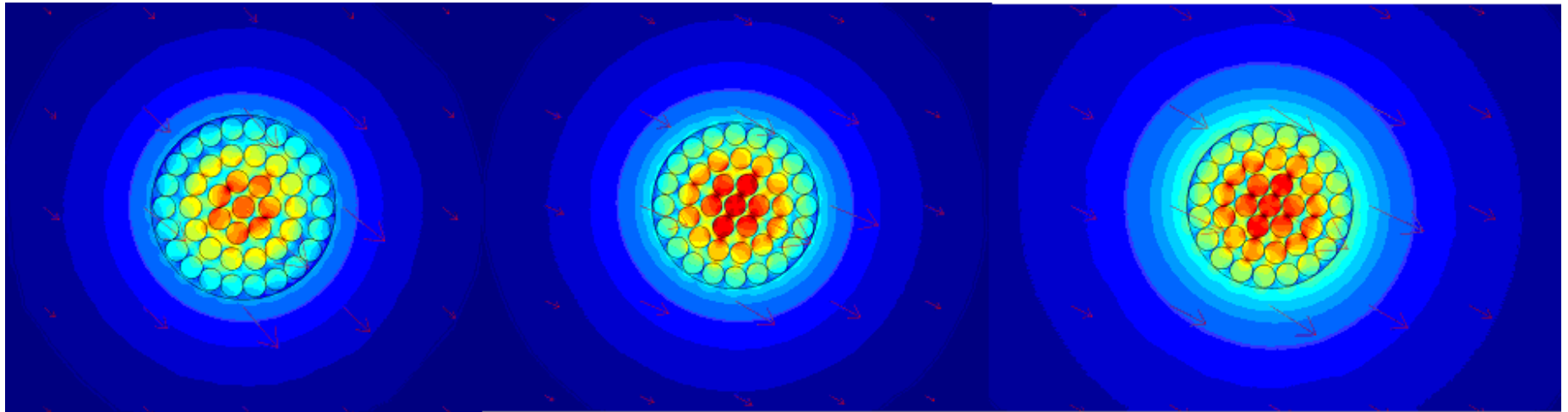




$$\frac{d}{\Lambda} = 0.7$$

$$\frac{d}{\Lambda} = 0.75$$

$$\frac{d}{\Lambda} = 0.8$$

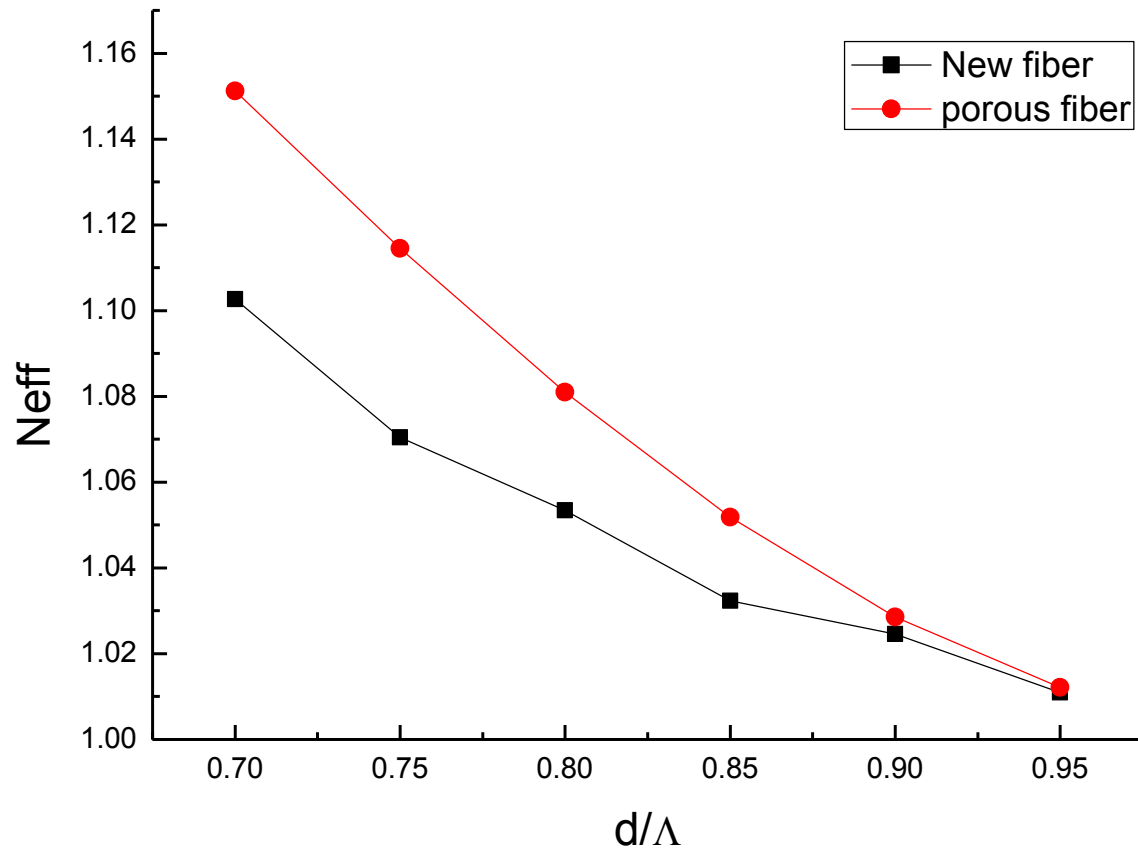


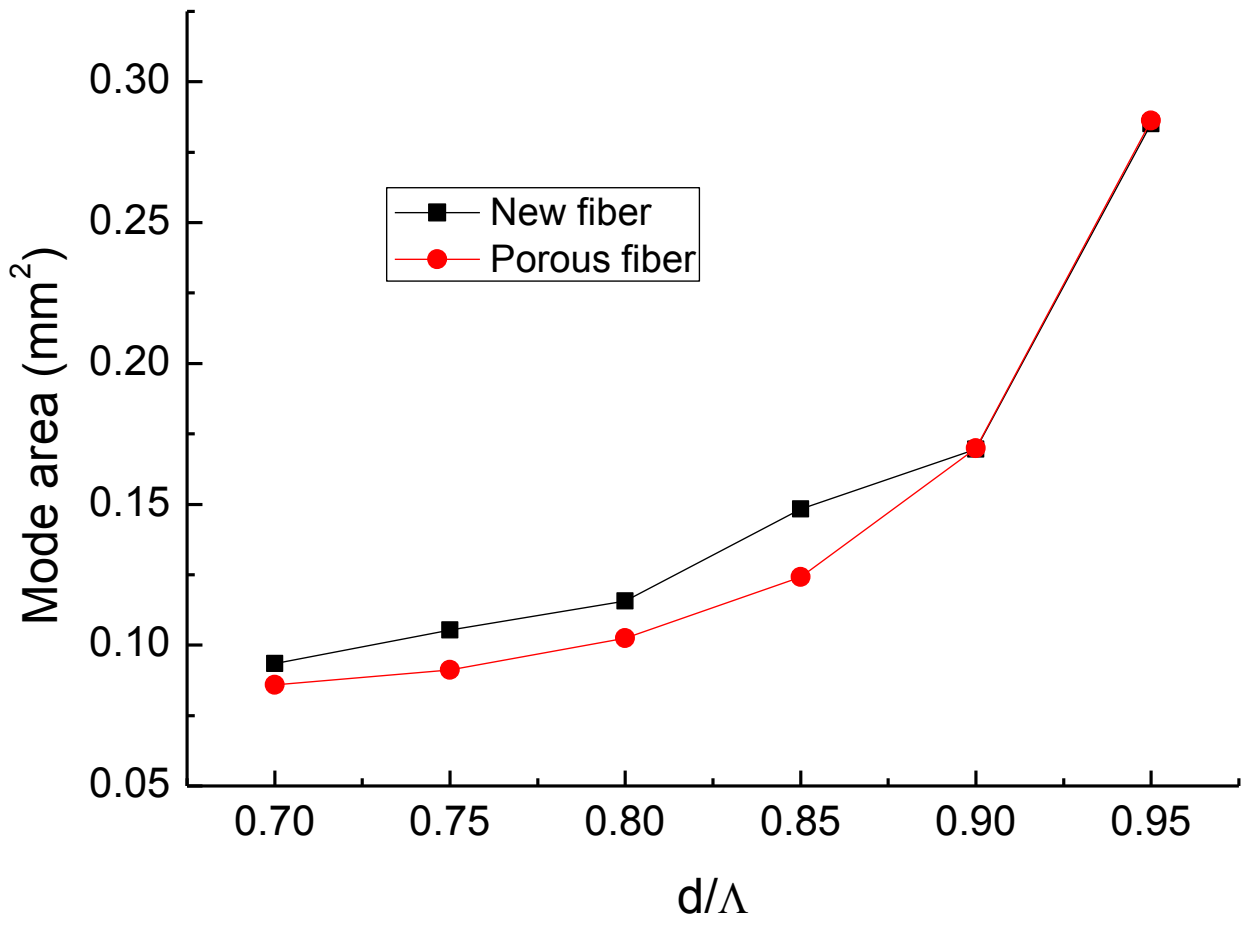
$$\frac{d}{\Lambda} = 0.85$$

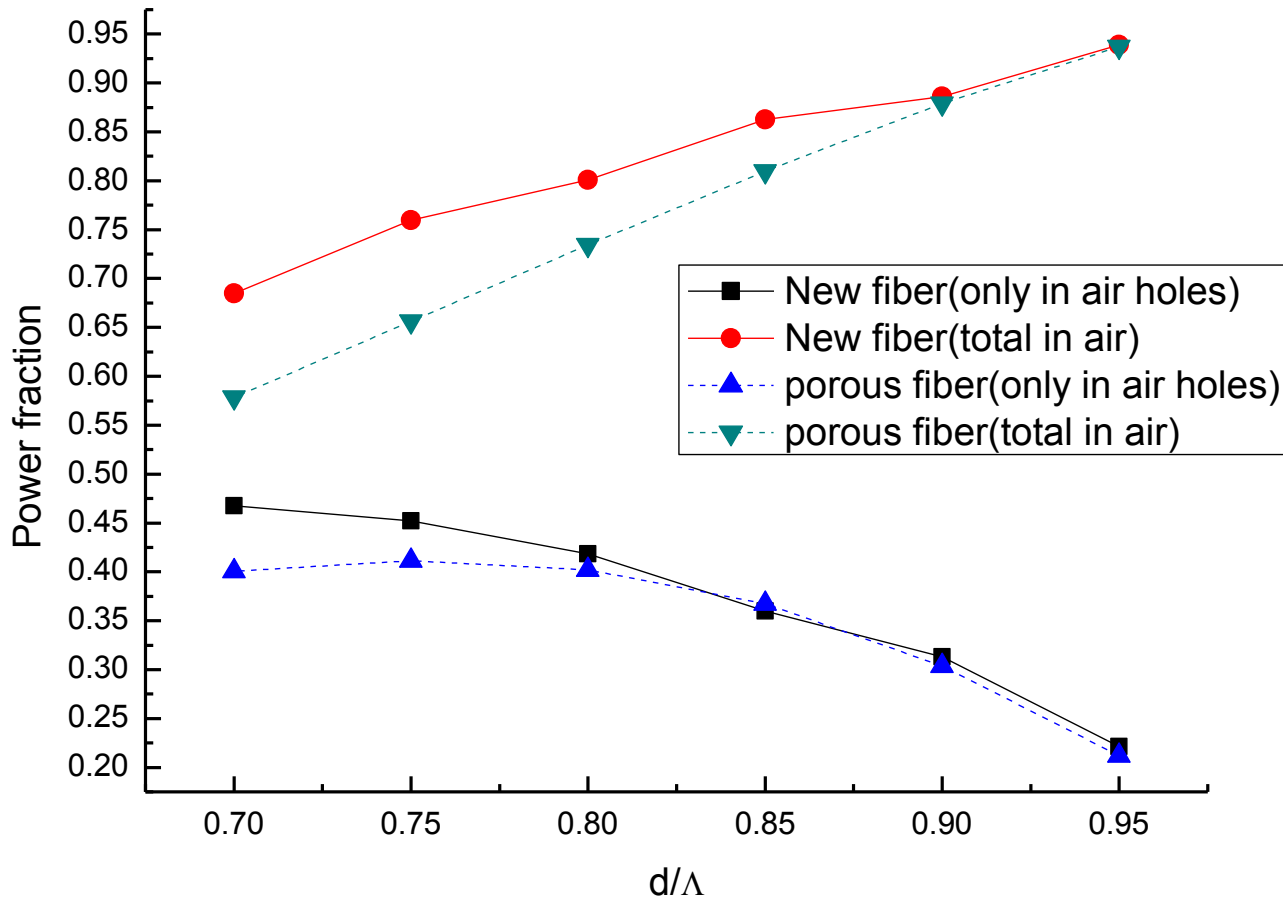
$$\frac{d}{\Lambda} = 0.9$$

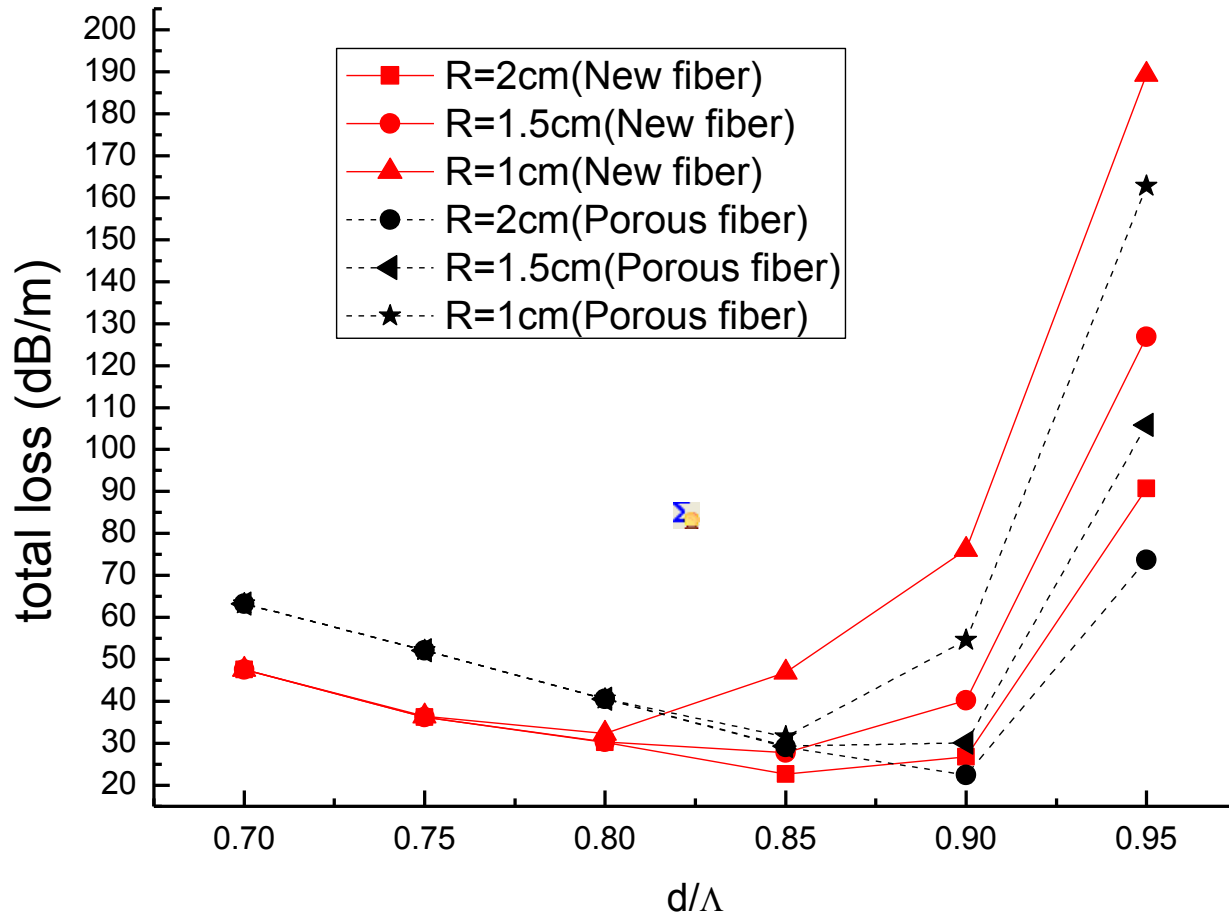
$$\frac{d}{\Lambda} = 0.95$$

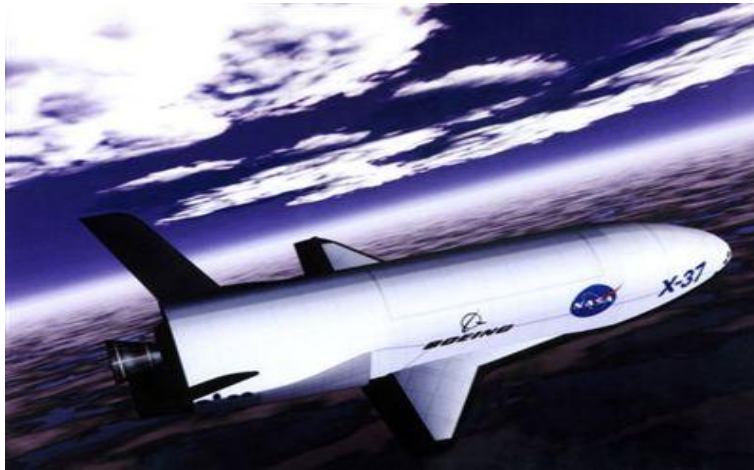
两种结构的对比











X—37B



- **X—37B** 太空飞机，也简称为“**X-37**”
- 北京时间**4月23日7点52分**（美国东部时间**4月22日19点52分**），美国研制的人类首架太空战斗机**X-37B**成功发射升空，“阿特拉斯**5号**”火箭执行了此次发射任务。**X—37B**是美国国防部与宇航局共同制定的“**FALCON**”计划、为实现“快速全球打击”的构想而研制的一种空天飞机。**X-37B**在设计上能够执行最长为期**270天**的太空任务。这种空天飞机在两小时内可攻击地球上任意一个目标。“**X-37**”太空飞机是“**FALCON**”项目中的第一个预研型号，是与微型航天飞机相似的飞行器。它将验证**NASA**轨道太空飞机项目中**25项**创新的航天技术。**X-37B**在战时，有能力对敌国卫星和其他航天器进行军事行动，包括控制，捕获和摧毁敌国航天器，对敌国进行军事侦察等等。

- **X-37B**空天飞机尺寸大约只有美国现役航天飞机的四分之一，长约**8.8米**，
- 翼展约**4.6米**，
- 起飞重量超过**5吨**，
- 空天飞机有着**20**多倍音速的奇快速度， **M>20**
- 能执行最长为期**270**天的太空任务，
- 可重复使用的、可利用自身有效载荷舱部署小型太空船，
- 可回收式小型载荷的空间飞行器，
- 可从事情报收集、发射小卫星、测试太空设备等工作，
- 是一种小型航天飞行器，但却是美军最高等军事机密之一

- 专家分析称，**X-37B**空天飞机是**1982**年“哥伦比亚号”航天飞机爆炸之后最值得期待的太空发射之一，在近**20**年的研制中，美国政府共投入数亿美元资金。虽然**X-37B**它仅是一种小型航天飞行器，但却是美军最高等军事机密之一。

- “美国宇航局长期以来参与了**X-37**太空飞机项目。我们将继续监视并分享相关的技术进展情况。”美国宇航局马歇尔太空飞行中心的科学和任务系统办公室首席工程师加里-温兹说。“我们期待首飞成功，并得到我们感兴趣的一些先进技术的飞行数据，比如热防护系统、导航与控制、用于自主返航和自主降落的材料性能。”

未来星球大战的新样式之一：利用制天权、对敌方的卫星通讯等空间作战资源进行第一波次的先行打击，斩断并瘫痪敌方远程性战略战术武器系统制导、控制的空间中继节点，使其丧失作战效能。

- “一是保护美国空间飞行器资源，确保美军在太空的资产安全，确保美军依靠的空间信息和侦察优势。二是打击敌方空间飞行器（包括卫星和次轨道飞行器）资源，使敌方无法开展空间作战。”

- 在轨道上，此太空飞机可以从事情报收集、发射小卫星、测试太空设备等工作。**X-37B**任务的目的是演示多种多样的试验和技术，包括：高耐久、高温热力学保护系统；耐贮存、无毒液态推进剂；和重要的新空气动力学特性——所有这些都将应用于未来的可复用太空飞行器。

- **X-37B**的试飞成功，是当今军事科技上的一种革命性的技术跨越，终于克服了“热障”对空天飞行器超高速飞行的限制，而实现了人类极速飞行的梦想。它在轨道上可以从事情报收集、发射小卫星、测试太空设备等工作，将验证**NASA**轨道太空飞机项目中**25**项创新的航天技术。并将演示多种试验和技术，包括：高耐久、高温热力学保护系统；耐贮存、无毒液态推进剂；和重要的新空气动力学特性——所有这些都应用于未来的可复用太空飞行器。它是美国独霸太空的多极战略均势的坍塌与中美俄全球视角下的军事较量的产物，是新技术革命与未来的作战样式的融合，美国凭借着这个技术制高点，它将牢牢地独霸着外太空或大气层外的制天权。它的和平利用，也将开创人类未来太空旅行的新纪元。
- 世界各国（包括中国）均对美国这一空天技术的举世瞩目最新进展给予高度的警觉及关注，并作出相应的跟踪计划。从空天及高超技术出发，以超高速、高温、不稳定湍流流场为特征，发展非接触光学方法测量技术将是当前空天及高超技术的迫切课题之一。

- **X—37B X-37B**战斗机由“阿特拉斯5号”火箭发射升空。
- 北京时间**4月23日7点52分**（美国东部时间**4月22日19点52分**），美国研制的人类首架太空战斗机**X-37B**成功发射升空，“阿特拉斯5号”火箭执行了此次发射任务。**X-37B**在战时，有能力对敌国卫星和其他航天器进行军事行动，包括控制，捕获和摧毁敌国航天器，对敌国进行军事侦察等等。
- 是美国国防部与宇航局共同制定的“**FALCON**”计划、为实现“快速全球打击”的构想而研制的一种空天飞机。这种空天飞机在两小时内可攻击地球上任意一个目标。**“X-37”**太空飞机是“**FALCON**”项目中的第一个预研型号，是与微型航天飞机相似的飞行器。由“阿特拉斯5号”火箭发射升空.它将验证**NASA**轨道太空飞机项目中**25**项创新的航天技术。
- **X-37B**发射后进入地球轨道并在太空遨游，在太空具体逗留时间尚未确定，**X-37B**在设计上能够执行最长为期**270**天的太空任务。结束太空之旅后，**X-37B**将进入自动驾驶模式返回地球，最后在加州范登堡空军基地或者附近备用基地——爱德华兹空军基地着陆。

- “美国宇航局长期以来参与了**X-37**太空飞机项目。我们将继续监视并分享相关的技术进展情况。”美国宇航局马歇尔太空飞行中心的科学和任务系统办公室首席工程师加里-温兹说。“我们期待首飞成功，并得到我们感兴趣的一些先进技术的飞行数据，比如热防护系统、导航与控制、用于自主返航和自主降落的材料性能。”

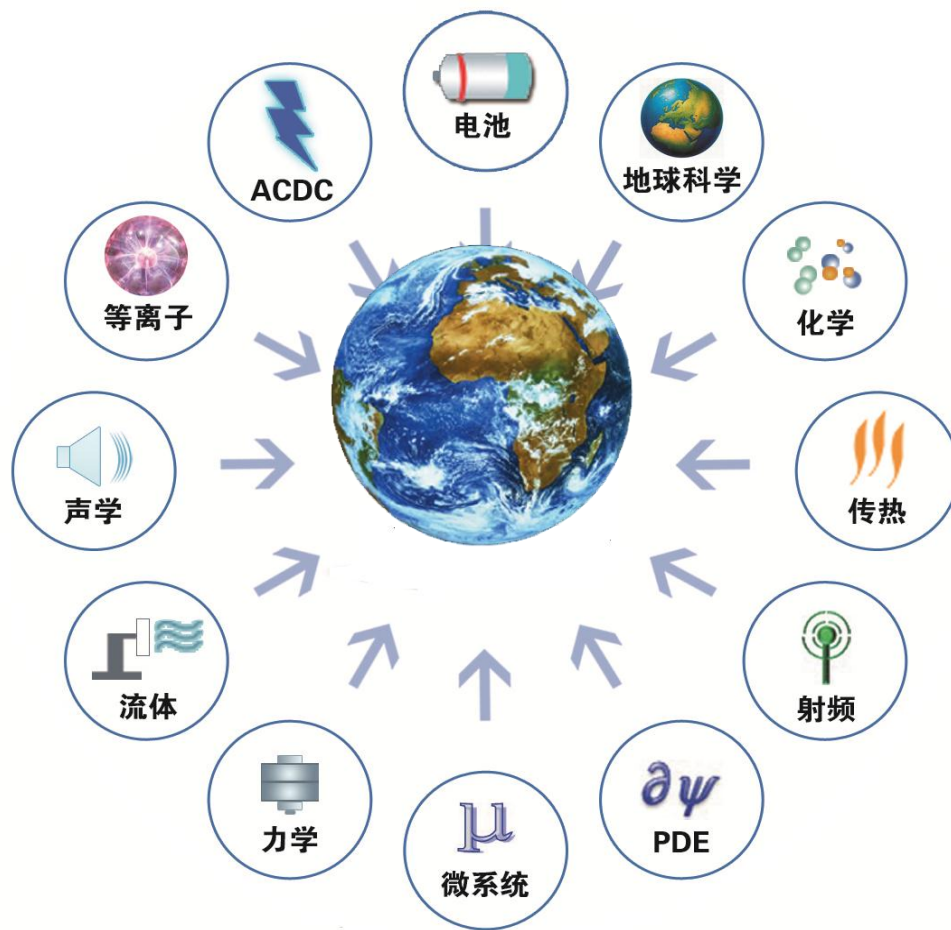
- 一、未来星球大战的新样式之一：利用制天权、对敌方的卫星通讯等空间作战资源进行第一波次的先行打击，斩断并瘫痪敌方远程性战略战术武器系统制导、控制的空间中继节点，使其丧失作战效能。
- 二、未来星球大战的新样式之二：从外太空对敌方地面战略性军事目标直接进行点穴式、闪电般、短距离的空中垂直打击。
- 三、未来星球大战的新样式之三：对失去民众支持的异己政权，依靠自己的全球快速精准打击能力，实施斩首行动，催生民心流变，诱致颜色革命、推进西方文明和平长入。

多物理仿真 科研创新的新契机



—中仿科技—
高级技术工程师
安琳 博士
Lynn@cntech.com.cn

单物理简化是人类对自然界的研究方法



每一个物理场在数学上对应一个偏微分方程

- 偏微分方程（PDE）：
 - 含有一个或多个未知变量及其偏微分的方程

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$$

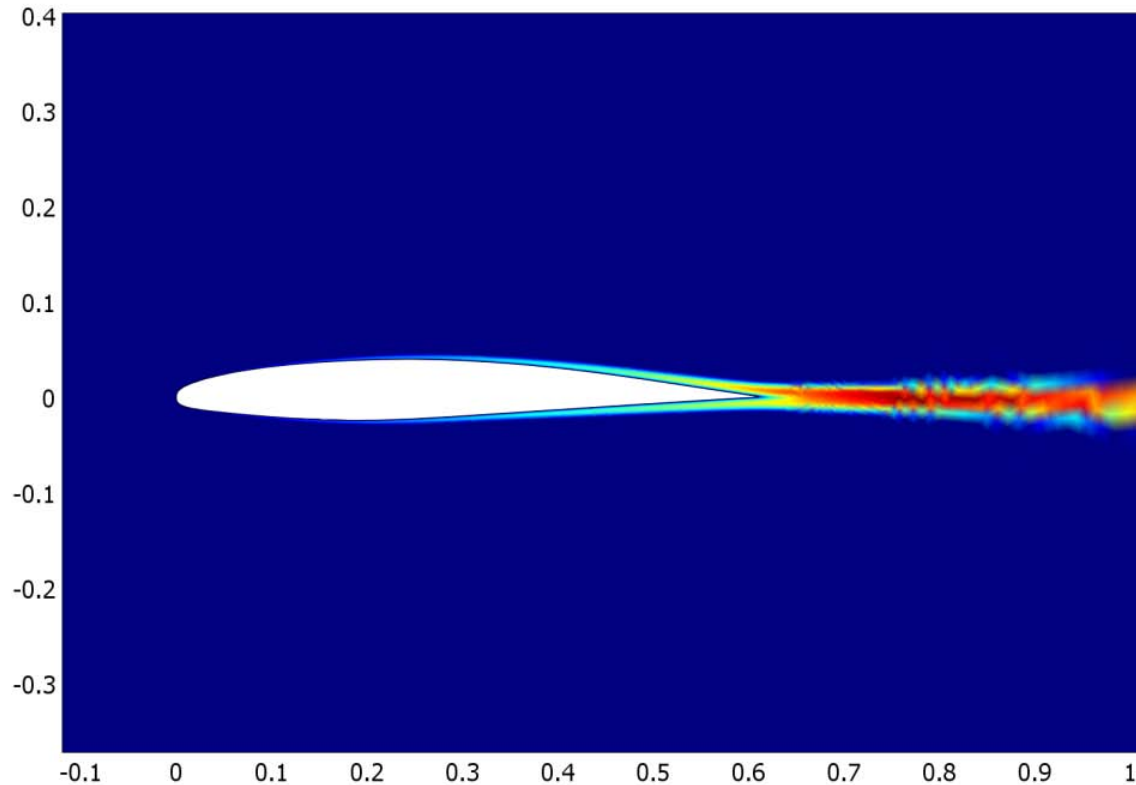
$$e_a \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial u}{\partial t} - \nabla \cdot (c \nabla u + \alpha u - \gamma) + \beta \cdot \nabla u + a u = f$$

新的挑战：多物理场分析

- 物质的对流扩散
- 温度

新的挑战：多物理场分析

- 流固耦合：机翼与气流的相互作用



- 高马赫数仿真

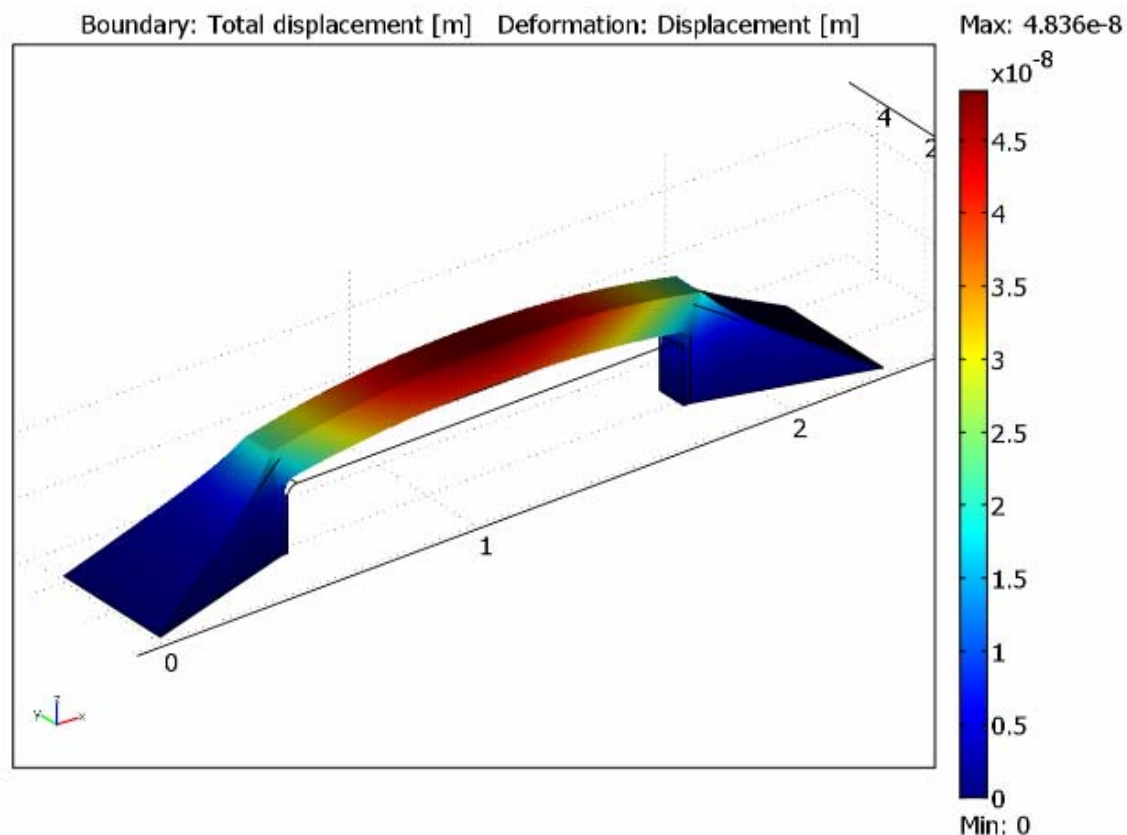
多物理场分析的本质是求解偏微分方程组

单向耦合

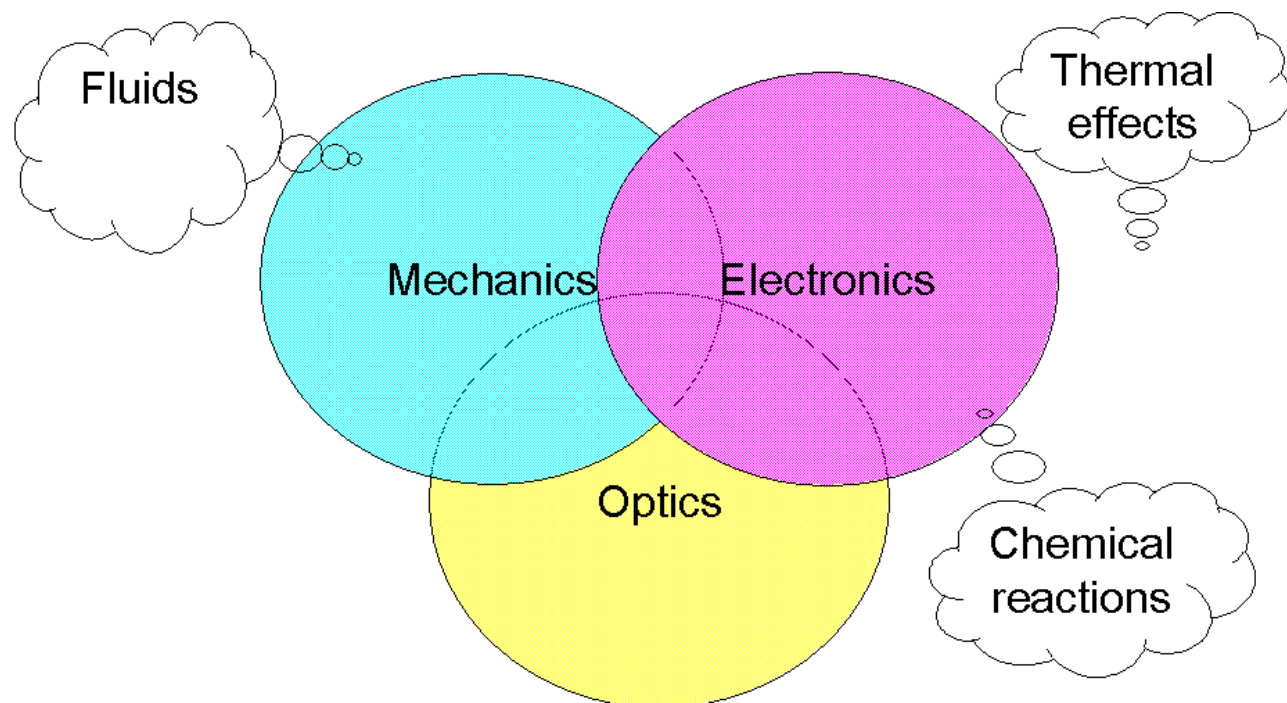
$$\begin{cases} -\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = Q_j & \text{电学} \\ \rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q & \text{传热} \\ S = S(T) & \text{力学} \end{cases}$$

双向耦合

$$\sigma = \rho_0 (1 + \alpha (T - T_0))$$



科研创新的新契机：交叉学科 (多物理场分析)



机械、电子 → 机电一体化、MEMS、光MEMS

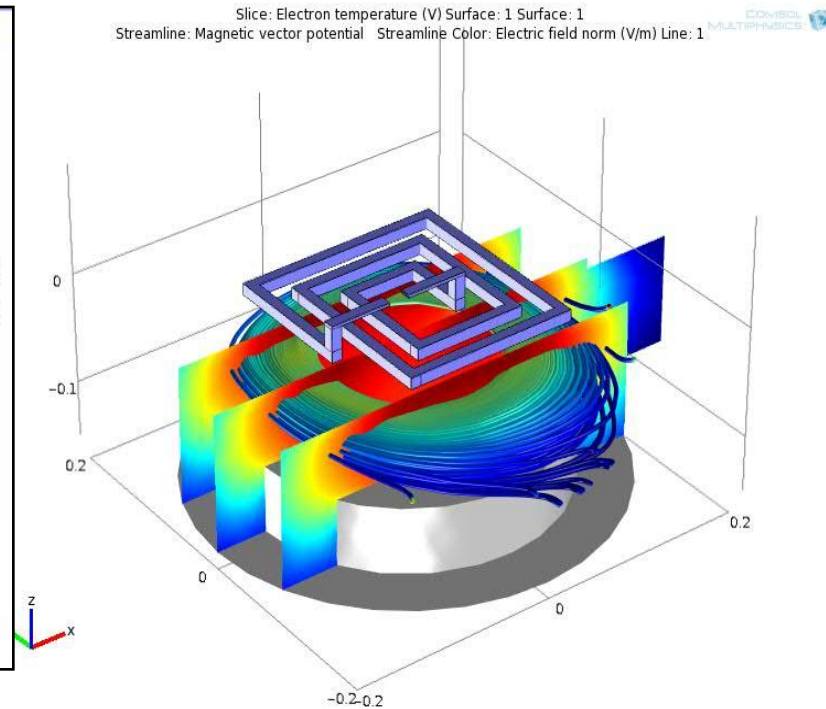
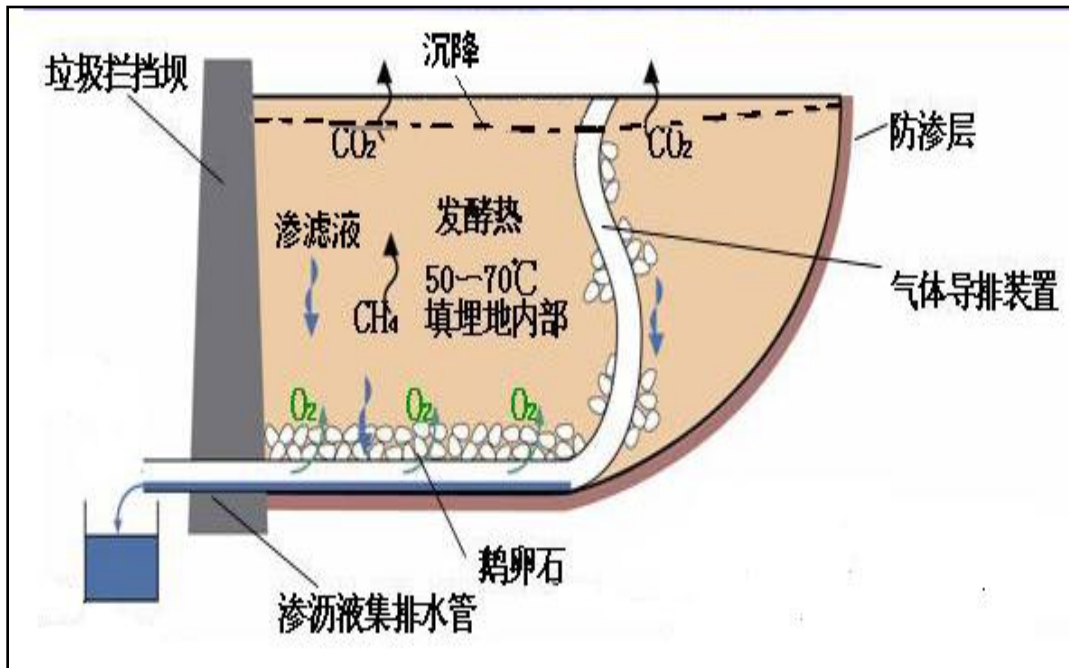
超声成像 → 光声成像、磁声成像

流体计算、化学反应 → 微流道的生化检测 (生物芯片)

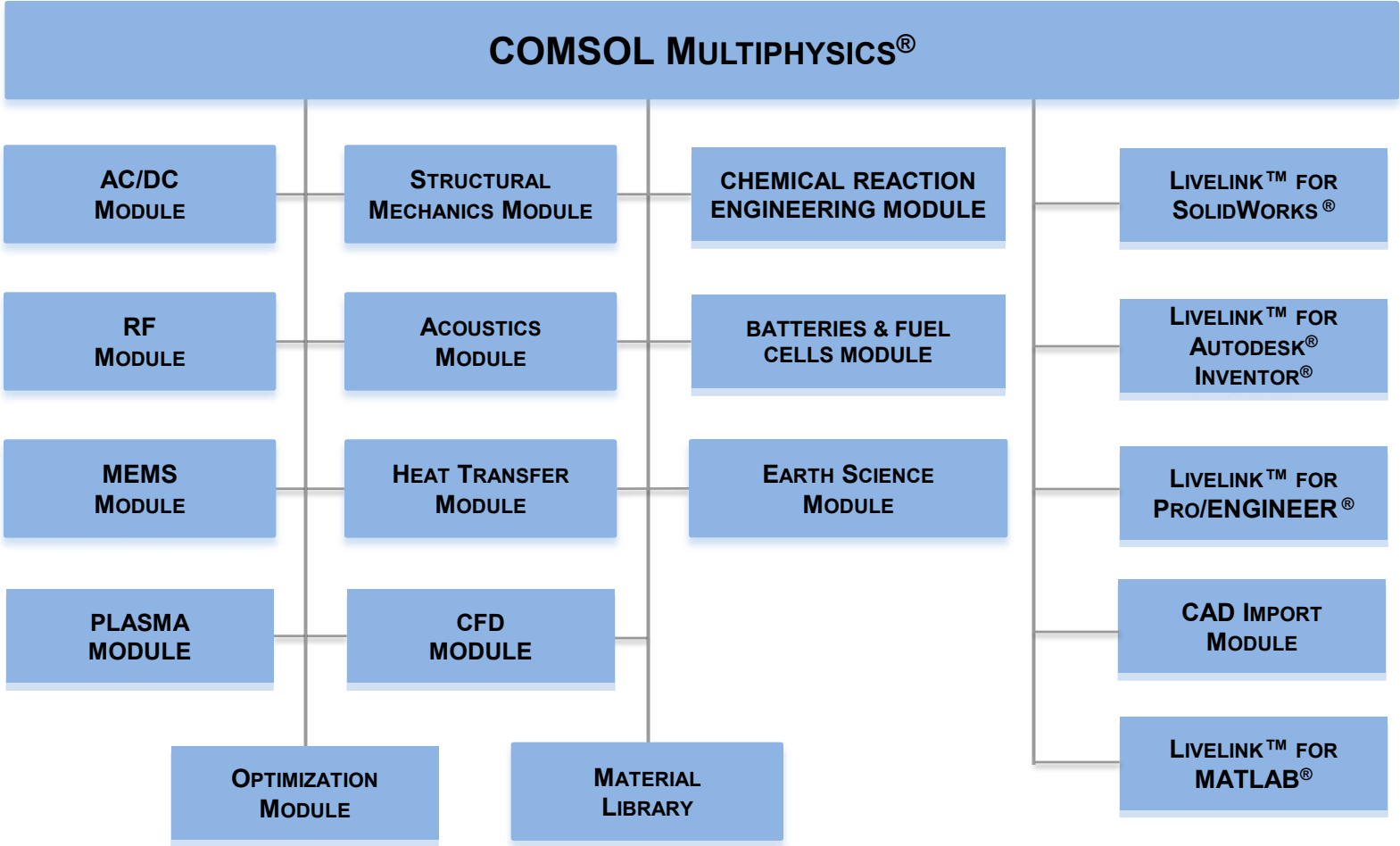
化学反应、电子技术 → 电化学反应、光化学反应

传热 (辐射)
应力应变

科研创新的新契机：复杂物理场分析



地球科学：渗流、多相流、结构力学、热学、化学反应、电磁计算
等离子体：电磁场、溶质运移、离子运移、化学反应、热分布、放电过程
半导体物理：电场、载流子运移、温度分布、应力应变、光学
电化学工业：电池（燃料电池、锂电）、电解电镀、腐蚀（刻蚀）



COMSOL学习班(2009年12月)



- Micro-nm materials
- Multi-Fields: Optics, Magnetic, Accoustic, Electric, Tempreture, Machnical, etc
- High speed flow

Conclusion

- COMSOL Multiphysics 是全球第一款真正的多物理场耦合分析软件；
- 是目前光学领域最有效、最全面的模拟计算软件。

以上仅仅是列举了部分与Comsol软件相关的研究内容

**THANKS FOR
YOUR ATTENTION!**