

- 传统光纤中的损耗 P5
光纤中传输的导模 P8-10
传统光纤的缺点 P11
光子晶体光纤 P13
光子晶体导光机制与优势 P20
全内反射型光子晶体光纤(永久单模传输特性) P24
可调节色散特性 P28
空气带隙型光纤 P33 导光原理 P34 表面模式P37 特点 P39
布拉格光纤 P41
光子晶体光纤的制备 P43
光子晶体光纤的应用 P47

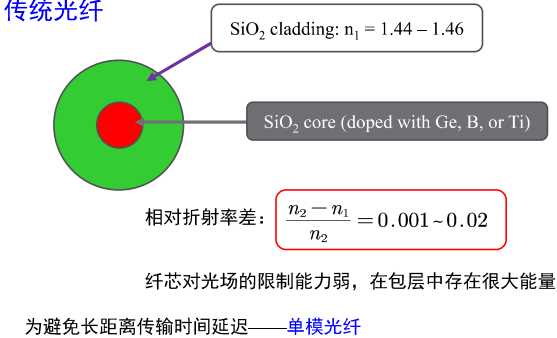
a

小结

- ▶ 优点
 - 在很大频率范围内支持光的单模传输
 - PCF允许改变纤芯面积，以削弱或加强光纤的非线性效应
 - 可灵活设计色散和色散斜率
 - 允许出现大于直角的光路转弯
 - PBG-PCF不受光波与纤芯材料之间的相互作用的限制，可大大限制光纤的非线性效应带来的影响并降低损耗
- ▶ 存在问题
 - 制备工艺不完善
 - PCF中非线性机制还需深入研究
 - 与传统光纤及器件的融合

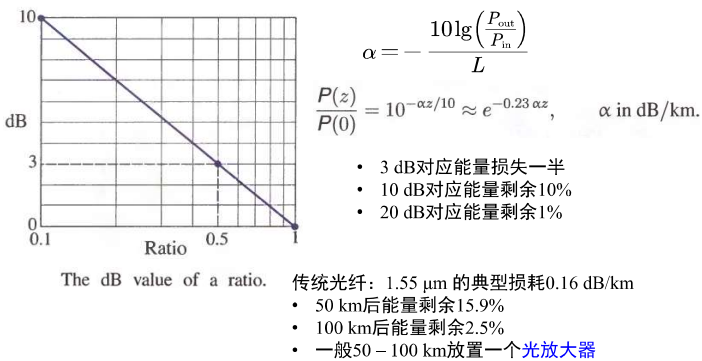
1、引言

传统光纤



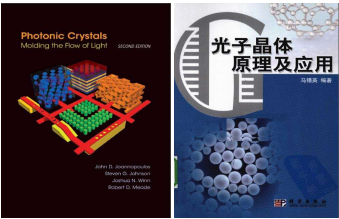
1、引言

传统光纤中的损耗



本讲内容

- ▶ 1、引言——为什么要研究光子晶体光纤？
- ▶ 2、光子晶体光纤简介
- ▶ 3、全内反射型光子晶体光纤
- ▶ 4、空气带隙型光纤
- ▶ 5、布拉格光栅
- ▶ 6、光子晶体光纤的制备
- ▶ 7、光子晶体光纤的应用

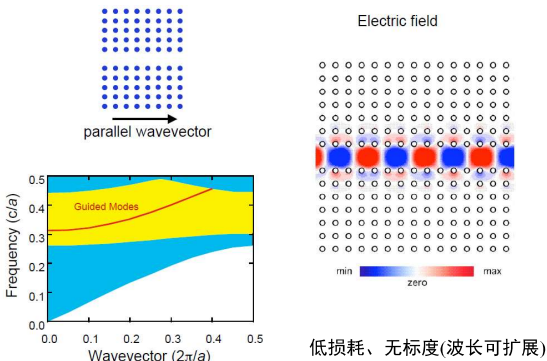


Outline

2 61 02

1、引言

光子晶体光波导——导模传播

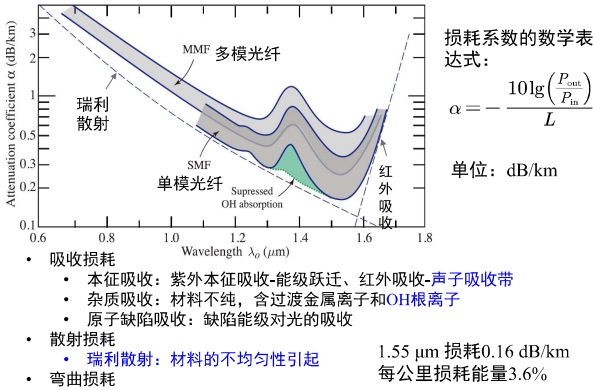


Guided modes, waveguide

3 61 03

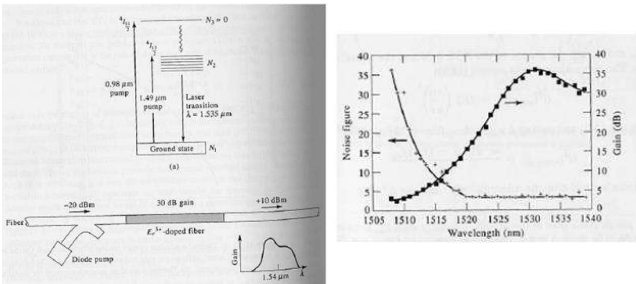
1、引言

传统光纤中的损耗



1、引言

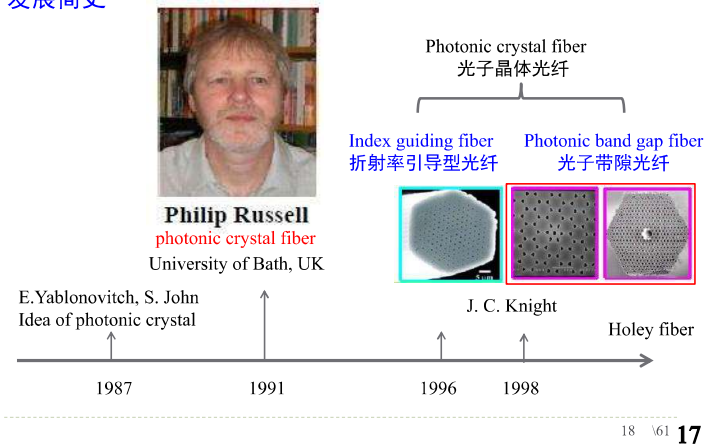
远距离通信中光纤光学放大



Er, gain maximum close to 1.55 micron
Usable bandwidth limited by the amplifier bandwidth to be approximately 30nm
Improving bandwidth by removing amplifiers, guiding in air?

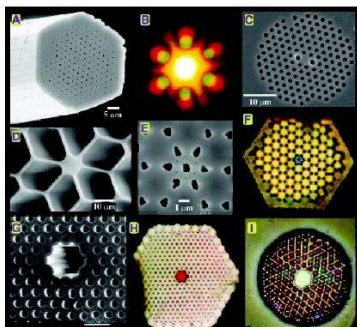
2、光子晶体光纤简介

发展简史



2、光子晶体光纤简介

各种类型的光子晶体光纤



"Photonic crystal fibers guide light by corralling it within a periodic array of microscopic air holes that run along the entire fiber length...."

P. Russell, Science, 299, 358, 2003

2、光子晶体光纤简介

光子晶体光纤分类

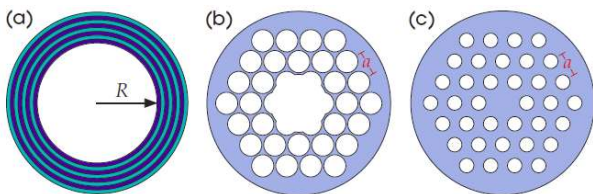
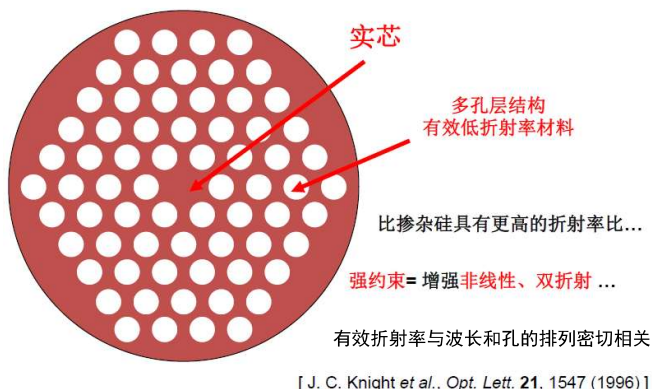


Figure 1: Three examples of photonic-crystal fibers. (a) Bragg fiber, with a one-dimensionally periodic cladding of concentric layers. (b) Two-dimensionally periodic structure (a triangular lattice of air holes, or "holey fiber"), confining light in a hollow core by a band gap. (c) Holey fiber that confines light in a solid core by index guiding.

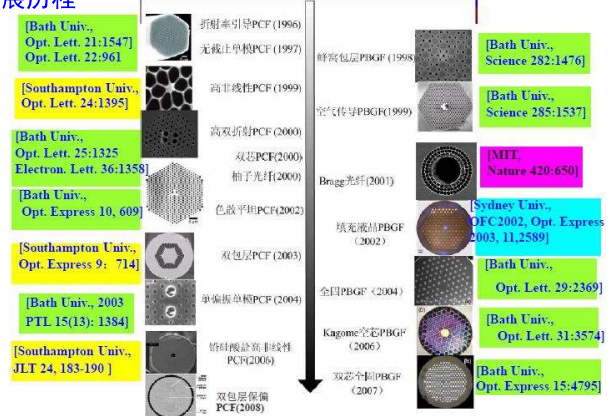
3、全内反射型光子晶体光纤



[J. C. Knight et al., Opt. Lett. 21, 1547 (1996)]

2、光子晶体光纤简介

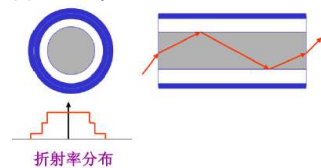
发展历程



2、光子晶体光纤简介

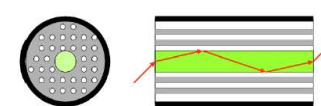
光子晶体导光机制与优势

普通光纤:



- 损耗、色散
- 单模光纤直径小
- 单模波长有限—特定的工作波长

光子晶体光纤:



- 低损耗, 色散可设计
- 强烈的非线性光学效应
- 大直径单模光纤
- 所有波长能单模工作

带隙型PBG-PCF导光

2、光子晶体光纤简介

光子晶体光纤分类

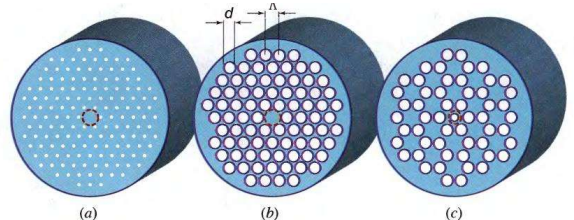
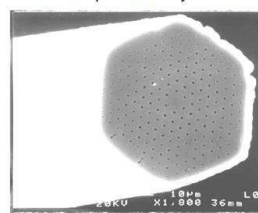


Figure 9.4-1 Various forms of holey fibers. (a) Solid core (dotted circle) surrounded by a cladding of the same material but suffused with a periodic array of cylindrical air holes whose diameters are much smaller than a wavelength. The average refractive index of the cladding is lower than that of the core. (b) Photonic-crystal holey fiber with cladding that contains a periodic array of large air holes and a solid core (dotted circle). (c) Photonic-crystal holey fiber with cladding that contains a periodic array of large air holes and a core that is an air hole of a different size (dotted circle).

3、全内反射型光子晶体光纤

永久单模传输特性

Solid core photonic crystal fiber.

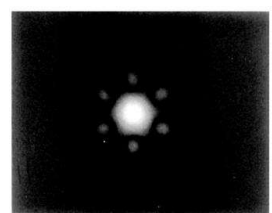


Solid core region nominally 4.6 μm wide

The fiber supports a single mode over the range of at least 458-1550nm

Knight et al., Opt. Lett. 21, 1547, 1996

对TIF-PCF, 只要空气孔直径 d 与孔间距 Λ 的比值小于0.45, 所有波长均可单模传输



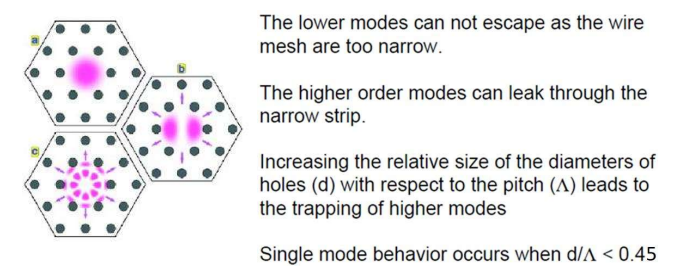
$$V_{PCF} = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_c^2 - n_{clad}^2}$$

波长减小, 折射率差也随着减小, 使 V_{PCF} 变化小, 从而实现无限单模传输

3、全内反射型光子晶体光纤

永久单模传输特性

单模特性物理解释：包层实现模式筛选



3、全内反射型光子晶体光纤

可调谐色散特性

群速度色散：不同频率以不同的群速度传播
材料色散——纤芯材料的折射率随波长变化而引起
波导色散——由模式的传播常数随波长变换引起
非色散介质中，电磁波的轴向传播常数为：

$$\beta = k_0 \cdot n = \frac{\omega}{c} \cdot n \quad n \text{ 有效折射率}$$

电磁波的相速度 v_p 和群速度 v_g 的定义分别为：

$$v_p = \frac{\omega}{\beta}, v_g = \frac{d\omega}{d\beta}$$

光信号在介质中传播单位距离的群时延定义为：

$$\tau = \frac{1}{v_g} = \frac{d\beta}{d\omega}$$

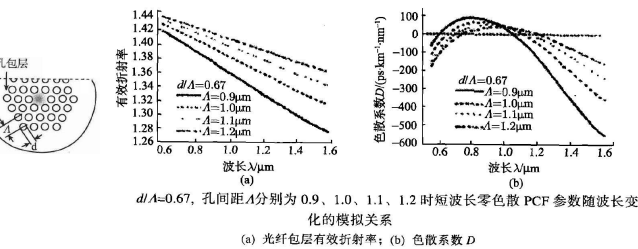
单模光纤的模内色散用色散系数 $D(\lambda)$ 表示，单位ps/(nm.km)，即单位波长间隔(1 nm)的各频率成分在光纤中传输1 km时所产生的群时延差：

$$D(\lambda) = \frac{d\tau}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{d\beta}{d\omega} \right) = -\frac{1}{c\lambda} k_0 \left(\frac{d^2 \beta}{dk_0^2} \right)$$

λ ：真空中波长

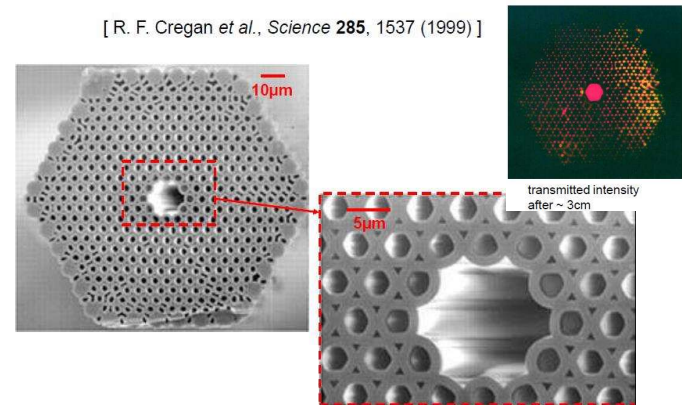
3、全内反射型光子晶体光纤

可调谐色散特性-仿真结果



- d/Λ 比值不变，改变孔间距Λ，也可以改变包层折射率
- 色散系数D(λ)改变，零点位置随之改变

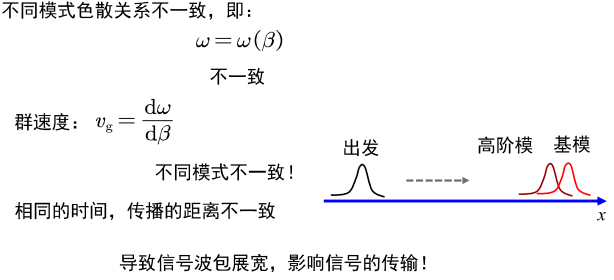
4、空气带隙型光纤



3、全内反射型光子晶体光纤

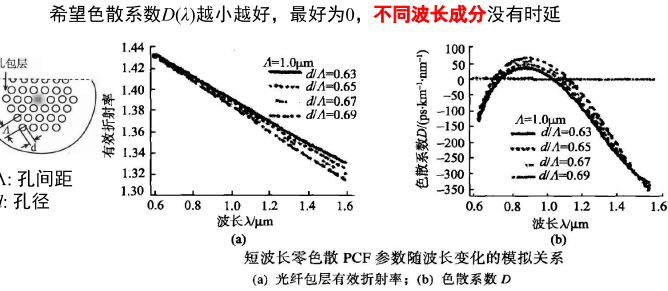
永久单模传输特性

为什么要单模传输？



3、全内反射型光子晶体光纤

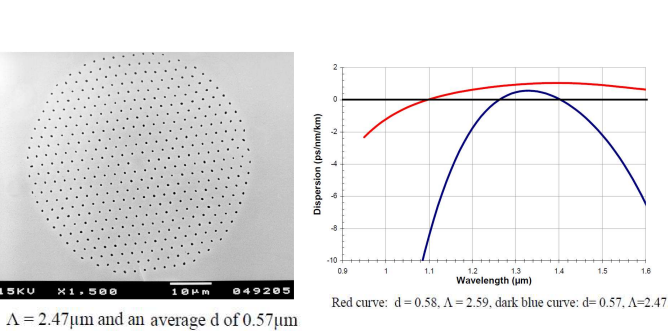
可调谐色散特性-仿真结果



- 包层有效折射率与孔间距和孔距相关
- 孔间距Λ不变，改变d/Λ比值可以改变包层折射率，β(ω) 改变
- 色散系数D(λ)改变，零点位置随之改变

3、全内反射型光子晶体光纤

可调谐色散特性-平坦和超低色散PCF

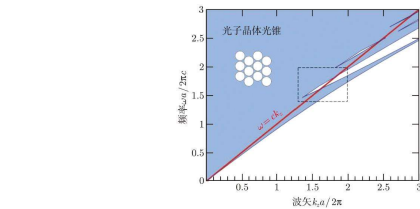


Λ = 2.47 μm and an average d of 0.57 μm

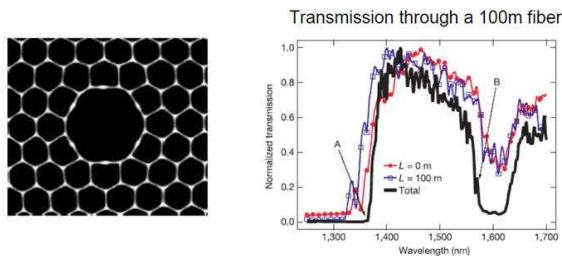
4、空气带隙型光纤

导光原理

二维光子晶体带隙？ 2D平面内的全向带隙可否？
二维光子晶体：考虑的是 $k_z = 0$ ，并没有考虑 $k_z \neq 0$ 的情况。
对于 $k_z \neq 0$ 的情况，比较复杂。对于由SiO₂构成的空心光子晶体，有结论：
当孔的半径 $r = 0.47a$ 时 (a 为空气孔周期)，对有限的 k_z 存在带隙



4、空气带隙型光纤



- The transmission spectra changes a little.
- 13 dB/km in propagation loss, comparable to **early days** of conventional optical fiber.
- Loss primarily due to the coupling of **core modes** to **surface modes**, and likely can be further reduced significantly in newer design.

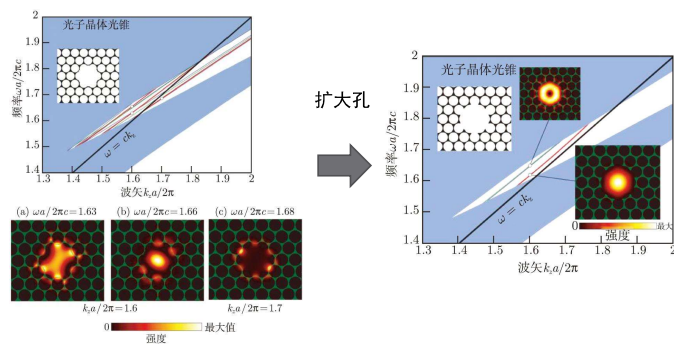
Smith et al., *Nature*, 424, 657 (2003)

36 \61 **35**

4、空气带隙型光纤

表面模式

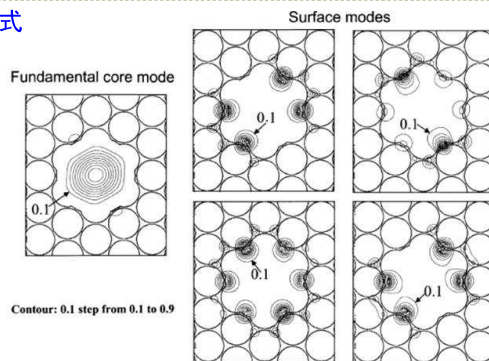
一种减小损耗的方案：去掉产生表面态的位置。



38 \61 **37**

4、空气带隙型光纤

表面模式



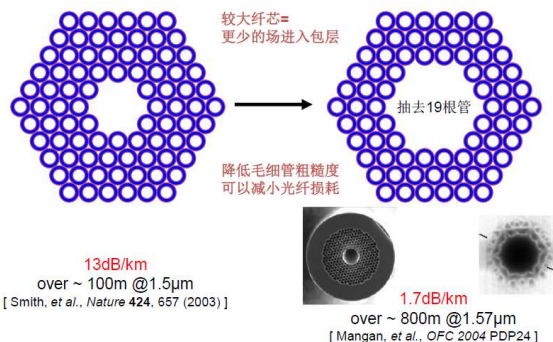
对于场集中在表面的模式，由于**表面粗糙度而产生的散射**比集中在芯层的模式要严重得多，造成极大的损耗！

H. Kim, J. Shin, S. Fan, M. Dignonnet, G. S. Kino, *IEEE J. Quantum Electronics*, 40, 552 (2004)

37 \61 **36**

4、空气带隙型光纤

表面模式



39 \61 **38**

4、空气带隙型光纤

空气带隙型光纤的特点

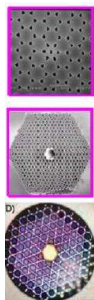
- 低非线性、高损伤阈值

低损耗

目前,通过降低毛细管粗糙度(散射↓)、增大纤芯空气孔直径、增大波长,最小损耗可达0.1dB/km

- ### ►独特的色散特性

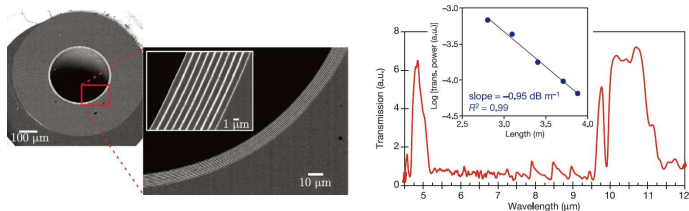
特殊应用：研究气体非线性、光与物质的相互作用、高功率激光传输、高峰值功率脉冲传输、锁模超短脉冲产生和放大等



- 缺点：制造工艺要求高

40 \61 **39**

5、布拉格光纤

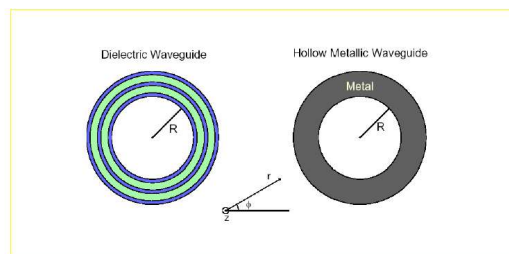


- Guiding of intense CO₂ laser light at 10.6 μ m wavelength for high power applications.
- Loss: 0.95 dB/m, remain 80% power after 1 m transmission.

Temelkuran et al., *Nature*, 420, 650 (2002)

43 \61 **42**

5、布拉格光纤



Using multilayer-film reflection to replace metal and create a light pipe.

The boundary condition for EM field at the boundary of core-film boundary can be designed to be rather similar to that at the metal boundary.

P. Yeh, A. Yariv and E. Marom, J. Opt. Soc. Am. 68, 1196 (1978).

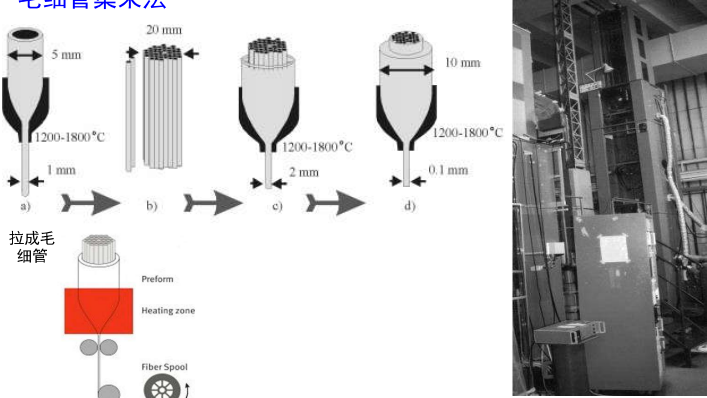
42 \61 **41**

6、光子晶体光纤的制备

44 \61 **43**

6、光子晶体光纤的制备

毛细管集束法



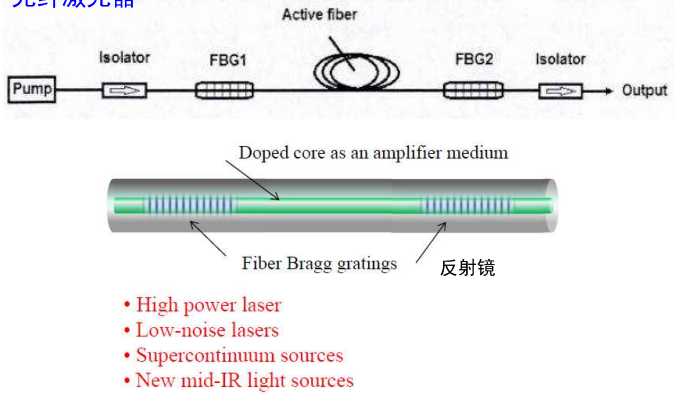
7、光子晶体光纤的应用

7、光子晶体光纤的应用

- ▶ 光纤激光器
- ▶ 光子晶体光纤带通滤波器
- ▶ 光子晶体光纤放大器
- ▶ 光子晶体光纤传感器
- ▶ 、 、 、 、

7、光子晶体光纤的应用

光纤激光器



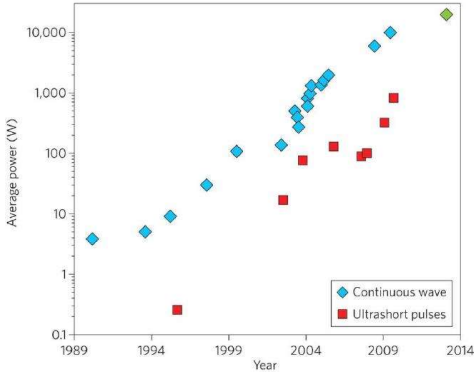
7、光子晶体光纤的应用

光纤激光器分类

按谐振腔结构分类	F-P 腔、环形腔、环路反射器光纤谐振腔以及“8”字型腔、DBR、DFB 光纤激光器
按光纤结构分类	单包层光纤激光器、双包层光纤激光器
按增益介质分类	稀土类掺杂光纤激光器、非线性效应光纤激光器、单晶光纤激光器、塑料光纤激光器
按工作机制分类	上转换光纤激光器、下转换光纤激光器
按掺杂元素分类	掺铒、钕、Pr ³⁺ 、铥、镱、铈等 15 种
按输出波长分类	S-波段(1280-1350nm)、C-波段(1528-1565nm)、L-波段(1561-1620nm)
按输出激光分类	脉冲激光器、连续激光器

7、光子晶体光纤的应用

光纤激光器功率增长



C. Jauregui, et al., Nat. Photon., 7, 861 (2013)

7、光子晶体光纤的应用

光纤激光器



2kW连续波光纤激光切割机

7、光子晶体光纤的应用

光子晶体光纤激光器

超连续谱产生通常是指窄带的入射光通过非线性作用光谱得到极大的展宽的现象。

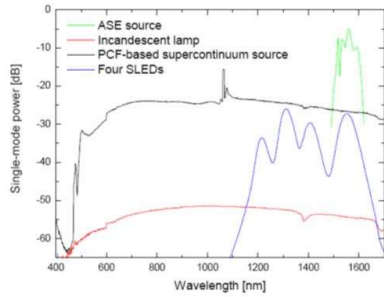
在孔中可以装载气体或低折射率掺杂(如掺锗等材料)液体,或使用高非线性折射率材料,从而使光子晶体光纤具有可控制的非线性。



University of Bath的研究人员开发的非线性PCF可以弥补超连续光纤激光器中的蓝光缺陷,增强了蓝光波段的输出

7、光子晶体光纤的应用

超连续谱光谱



不同光源发光光谱的对比：
ASE：放大自发辐射
超连续光源频谱：蓝光 – 近红外

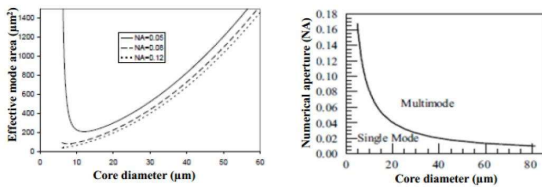
54 161 53

7、光子晶体光纤的应用

高功率光纤激光器

Requirements: Large Mode Area with Single-mode Operation

Challenges:



*Li et al., "fiber design for higher power laser", Proc. OFS/PDE Vol. 6469, 64690H, (2007)

- Core diameter increases – Effective mode area increases
- Too large core diameter – Waveguide become multimode

So, there is a trade off between LMA and SM operation

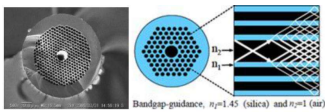
56 161 55

7、光子晶体光纤的应用

其他应用

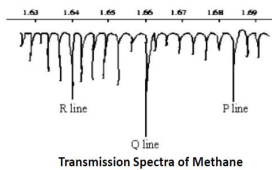
7、光子晶体光纤的应用

气体探测器

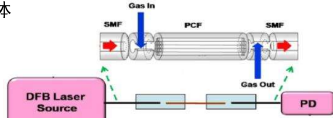


HC-PBG Fiber

带隙引导型光纤：
多孔，利于气体
在其中传输



Transmission Spectra of Methane



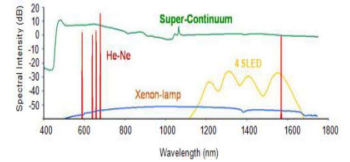
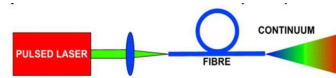
Methane gas detection at 1653.7nm with
detection sensitivity of 500ppm.

不同浓度甲烷气体对光的吸收不同——检测透过光的强度

60 161 59

7、光子晶体光纤的应用

超连续谱的作用



A supercontinuum source provides:

- Ultra broadband white-light spectrum
- Single-mode beam characteristics
- Excellent pointing stability
- High Brightness
- This type of source is required for High resolution imaging: Optical Coherence Tomography (OCT), and Early Cancer Detection
- Biophotonics: Flow cytometry
- Spectroscopy: Pump probe experiments, Time-resolved spectroscopy

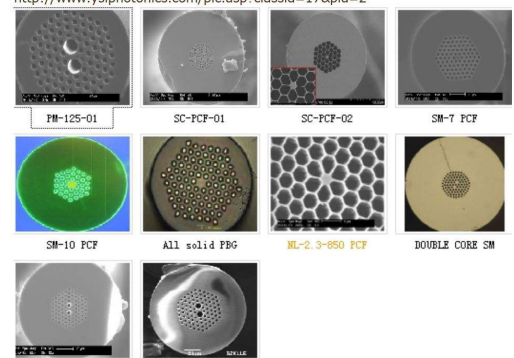
55 161 54

7、光子晶体光纤的应用

光子晶体光纤激光器

自主研发生产的光子晶体光纤、掺稀土光纤、无源匹配光纤可供选择
<http://www.yslphotonics.com/pic.asp?classid=17&pid=2>

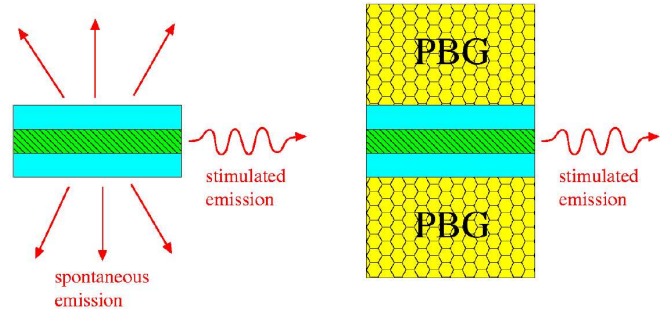
武汉 安扬激光



57 161 56

7、光子晶体光纤的应用

抑制自发辐射



Low-threshold lasers, single-mode LEDs, mirrors, optical filters

58 161 57

59 161 58