

光子晶体光纤的特性与研究现状

杜 勇^{1,2}, 马中华¹, 陈朝阳¹, 林月美¹, 郑佳春¹

(1. 集美大学 信息工程学院, 福建, 厦门 361021; 2. 厦门大学 电子工程系, 福建, 厦门 361005)

摘 要:光子晶体光纤(PCF)具有独特的光学特性和灵活的设计,在光通信等领域具有广阔的应用前景。文阐述了 PCF 的一些独特光学性质,总结了光子晶体光纤的研究成果。

关键词:光子晶体;光子晶体光纤;光子晶体光纤激光器

中图分类号: TN29

1 引言

光子晶体光纤(PCF)的概念由 J. Russell 等人于 1992 年提出,其结构是由石英棒或石英毛细管排列拉制后在中心形成缺陷孔或实心。1996 年 Knight 等人首次制造出了具有周期性结构包层的 PCF,1998 年 Knight 等人又研制出包层具有蜂窝型空气孔排列结构的光子带隙光纤。PCF 有两种类型:一种是具有石英-空气基质包层的实芯石英光纤,它由纯石英纤芯和具有石英-空气基质的包层材料组成;另一种是具有石英-空气光子晶体包层的空芯石英光纤。PCF 与常规光纤相比具有许多奇异的特性,有效地扩展和增加了光纤的应用领域^[1]。PCF 经专门设计可具有大模面积且保持无限单模的特性,有效地克服常规光纤的设计缺陷,以这种具有新颖波导结构和特性的光纤作为有源掺杂的载体,并把双包层概念引入到光子晶体光纤中,可以研制光子晶体光纤激光器。本文阐述了 PCF 的一些独特光学性质,总结了光子晶体光纤的研究成果。

2 光子晶体光纤的导光原理

根据纤芯引入缺陷态的不同,PCF 导光机理可以分为两类:全内反射型和光子带隙型。

2.1 全内反射型 PCF 导光原理

周期性缺陷的纤芯折射率(石英玻璃)大于周期性包层折射率(空气),从而使光能够在纤芯中传播,这种结构的 PCF 导光机理依然是全内反射,但与常规 G. 652 光纤有所不同,由于包层包含空气,所以这种机理称为改进的全内反射,这是因为空芯 PCF 中的小孔尺寸比传导光的波长还小的缘故。

2.2 光子带隙型 PCF 导光机理

理论上求解光波在光子晶体中的本征方程即可导出实芯和空芯 PCF 的传导条件,即光子带隙导光理论。在空芯 PCF 中形成周期性的缺陷是空气,空气芯折射率比包层石英玻璃低,但仍能保证光不折射出去,这是因为包层中的小孔点阵构成光子晶体。当小孔间距和小孔直径满足一定条件时,其光子能隙范围内就能阻止相应光传播,光被限制在中心空芯之内传输。这种 PCF 可传输 99% 以上的光能,而空间光衰减极低,光纤衰减只有标准光纤的 $1/2 \sim 1/4$ 。

3 光子晶体光纤的分类

3.1 空心光子晶体光纤

空心光子晶体光纤中的光是在由周期性排列的硅材料围成的空心中心传输。因为只有很少一部分光在硅材料中传输,所以相对于常规光纤来说,材料的非线性效应明显降低,损耗也大为减少。空心光子晶体光纤有可能成为下一代超低损耗传输光纤,空心光子晶体光纤将广泛应用于光传输,脉冲整形和压缩,传感光学和非线性光学中。

3.2 高非线性光子晶体光纤

高非线性光子晶体光纤中的光是在由周期性排列的硅材料空气孔围成的实心硅纤芯中传输。通过选择相应的纤芯直径,零色散波长可以选定在可见光和近红外波长范围(670nm ~ 880nm),可用于频率度量学、光谱学或光学相干摄影学中产生超连续光。

3.3 宽带单模光子晶体光纤

常规单模光纤实际上是波长比二次模截止波长小的多模光纤,而宽带单模光子晶体光纤是真正意

* 基金项目:福建省自然科学基金资助项目(2006J0410);福建省自然科学基金资助项目(2006J0410)

义上的单模光纤,这种特性是由于其包层由周期性排列的多孔结构构成,主要用于短波长光传输,传感器和干涉仪。

3.4 保偏光子晶体光纤

传统保偏光纤双折射现象由纤芯附近合成材料热扩张差异形成。保偏光子晶体光纤是由非周期结构纤芯中空气和玻璃的大折射率差而形成双折射现象,从而得到更小的拍长,减小偏振态和保偏消光比之间的耦合曲率,主要用于光传感器、光纤陀螺和干涉仪。

3.5 超连续光谱发生器的光子晶体光纤

超连续光子晶体光纤是特别设计用来把一种新的 Q 变换 Nb^{3+} 微芯片激光器变成一种结构紧密,低成本,谱宽覆盖 550nm ~ 1600nm 范围,平坦度好于 5dB 的超亮光超连续光源。由于有较好的色散系数,20m 长的这种光纤就可以实现与脉宽为 1ns,重复率为 6k,平均功率为几十毫瓦的脉冲激光器具有几乎相同的变换效率。超连续光源主要应用于光子学设备的测试、低相干白光干涉计、光相干成像和光谱学中。

3.6 大数值孔径多模光子晶体光纤

大数值孔径多模光子晶体光纤中的光是在由同心环的硅材料空气孔围成的实心硅纤芯中传输。由于实心纤芯和包层的大折射率差,使得该光纤数值孔径比全硅多模光纤大得多。大数值孔径增加了从白炽灯或弧光灯热光源和从低亮度半导体激光器获取光的能力。这种光纤在 633nm 处数值孔径可达 0.6,主要应用于白炽灯或弧光灯光的传输、低亮度泵浦激光的传输以及光传感器中。

4 PCF 的特性

4.1 无截止单模

普通单模光纤随纤芯尺寸的增加会变成多模光纤。对于 PCF 只要其空气孔径与孔间距之比小于 0.2,可在从蓝光到 $2\mu\text{m}$ 的光波下单模传输,不存在截止波长。这就是无截止单模传输特性,且这种特性与光纤绝对尺寸无关,因此通过改变空气孔间距可调节模场面积,在 1550nm 可达 $1 \sim 800\mu\text{m}^2$,已制成了 $680\mu\text{m}^2$ 的大模场 PCF,大约为常规光纤的 10 倍。小模场有利于非线性产生,大模场可防止发生非线性,这对于提高或降低光学非线性有极重要的意义。这种光纤具有很多潜在应用,如激光器和放大器(利用高非线性光纤),低非线性通信用光纤,高光功率传输等。

4.2 不同的色度色散

真空中材料色散为零,空气中的材料色散也非常小,空气芯 PCF 的色散非常特殊。由于光纤设计很灵活,只要改变孔径与孔间距之比,即可达到很大的波导色散,还可使光纤总色度色散达到所希望的分布状态,如零色散波长可移到短波长,从而在 1300nm 实现光孤子传输。

4.3 极好的非线性效应

G. 652 光纤中出现的非线性效应是由于光纤单位面积上传输的光强过大造成严重损伤系统传输质量的一个现象。而在光子带隙导光 PCF 中,可以通过增加 PCF 纤芯空气孔直径(即 PCF 的有效面积)来降低单位有效面积上的光强,从而达到大大减少非线性效应的目的^[2],这个特性为制造大有效面积 PCF 奠定了技术基础。另外减小光纤模场面积,可增强非线性效应,从而使光子晶体光纤同时具有强非线性和快速响应特性。常规光纤有效截面积在 50 - $100\mu\text{m}^2$ 量级,而光子晶体光纤可以做到 $1\mu\text{m}^2$ 量级,所以各种典型非线性光纤器件如科尔光闸、非线性环形镜等就可以做成比普通光纤短 100 倍。通过改变孔间距可以调节有效模场面积,调节范围在 $1.5\mu\text{m}$ 波长处约为 $1 \sim 800\mu\text{m}^2$ 。在孔中可以装载气体,也可以装载低折射率液体,从而使 PCF 具有可控制的非线性。

4.4 优良的双折射效应

保偏光纤中,双折射效应越强,波长越短,保持传输光偏振态越好。在 PCF 中,只需要破坏 PCF 剖面圆对称性,使其构成二维结构就可以形成很强的双折射。通过减少空气孔数目或者改变空气孔直径的方式,可以制成比常用熊猫保偏光纤高几个数量级的高双折射率 PCF 保偏光纤^[3]。

4.5 较高的入射功率

光子晶体光纤的全波长单模特性与光纤绝对尺寸无关,放大或缩小光纤照样可以保持单模传输,这表明可以根据需要来设计纤芯面积。英国 Bath 大学研究人员已经制作了工作在 458nm,纤芯直径是 $23\mu\text{m}$ 的单模光子晶体光纤。其纤芯面积大约是传统光纤纤芯面积 10 倍左右,用于高功率传输时,不会出现非线性效应。

4.6 易于实现多芯传输

多芯传输有两个优点:一是提高了信道通信的容量,二是解决了单芯难以胜任的复杂通信网络、矢量弯曲传感、光纤耦合等问题。光子晶体光纤使得多芯的结构能被精确定位且具有良好的轴向均

匀性,无须附加其他工艺。

5 光子晶体光纤的研究成果

1996年,英国南安普顿大学光电研究中心和丹麦技术大学电磁系首先报道了成功制备出 PCF。莫斯科大学 A. M. Zheltikov 等人也进行了包层具有周期分布空气导孔的多孔光纤的研制。研究发现,改变多孔光纤包层的几何结构,可有效地增强光纤中非线性效应。这种方法可应用于脉冲压缩、光孤子的形成和受激拉曼散射的增强。

2001年,英国 Bath 大学 Wadsworth 等人实现了双包层光子晶体光纤结构。双包层光子晶体光纤掺杂离子为 Yb^{3+} 离子,纤芯直径 $15.2\mu\text{m}$,数值孔径 0.11,内包层直径 $150\mu\text{m}$,数值孔径 0.8,利用 20W 光纤耦合二极管阵列泵浦该光纤,光纤长度为 17m,获得了 3.9W 功率输出,斜效率 21%。实验中发现,双包层光子晶体光纤存在随机散射中心,说明纤芯中存在着缺陷,有待进一步完善光子晶体光纤的结构。

2002年,日本 Norihiko 等人以锁模掺 Er^{3+} 光纤激光器为泵浦源,结合周期极化 LiNbO_3 ,泵浦长 60cm 的高非线性 PCF,得到波长调谐范围为 $0.78 - 0.90\mu\text{m}$ 的孤子脉冲,脉宽为 55fs,所用 PCF 芯径为 $1.7\mu\text{m}$,零色散波长大约在 $0.69\mu\text{m}$ 处。

2003年1月,Wadsworth 等人报导了利用大模面积空气包层 PCF 研制的高功率 PCF 激光器,为双程后向线性腔结构,最大输出功率 3.9W,斜率效率 30%,实现单横模运转。所采用的 PCF 纤芯直径为 $15\mu\text{m}$,内包层数值孔径大于 0.8。为了使包层中的泵浦光最大限度的耦合到纤芯中,提高纤芯对泵浦光的吸收,PCF 的掺杂纤芯采用了偏芯设计。

2004年,Blaze 曾发布了一款新型 PCF,该光纤是针对 Nd^{3+} 微芯片激光器特别优化设计的,可产生超连续光谱,这种光谱可在单模光纤中产生一个宽带输出,光谱亮度超过太阳 10000 倍。Blaze 表示利用微芯片激光器和 PCF 可获得高性能光源,将会取代超高亮度 LED 等传统的宽带光源。清华大学研究人员理论上计算了 PCF 的色散值,所选择 PCF 结构参数为:空气孔间距为 $0.8\mu\text{m}$,空气孔直径与空气孔间距之比是 0.835。研究结果表明:PCF 的色散补偿作用在高速率、大容量、远距离的 WDM 系统中具有极大的应用价值。

2005年,英国 Bath 大学 A. Ortigosa 和 Blanch 等人用 200fs 的泵浦脉冲在 PCF 中产生了超连续谱,日本电报电话公司 T. Yamamoto 等人用波长 1562nm、脉宽 2.2ps、重复频率 40GHz 的光脉冲注入到 200m 长的色散平坦保偏 PCF 中,在 1550nm 区域产生了超过 40nm 的均匀超连续谱,而美国 Rochester 大学 Z. M. Zhu 等人利用丹麦 Crystal Fiber A 公司低双折射、高非线性 PCF 获得 600~1000nm 的超连续谱^[4]。

参考文献:

- [1] 皱丽娜,等.光子晶体的研究新进展及应用.半导体光电,2006,27(3):231-235.
- [2] 闫培光,等.纳秒激光通过光子晶体光纤的光谱特性.光子学报,2003,32(7):896-899.
- [3] 阮双琛,杨冰,朱春艳,等.13.4W 光子晶体光纤激光器的研究.光子学报,2004,33(1):89-92.
- [4] Limpert J. High - power air - clad large - mode - area photonic - crystal - fiber laser. Optics Express. 2003, 11(7):818-823.

(上接第 78 页) 主要含有氟酸或氟化物,在废液中加入氢氧化钙至废液充分呈碱性为止,充分搅拌后,放置 12 小时,然后过滤,滤液用碱液进行处理。要进一步降低含氟量,可用阴离子交换树脂进一步处理即可。

4 结语

总之,保护自然环境,是人类共同的呼声,无机实验室所产生的“三废”数量少、种类多、间断性强、成分复杂多变,对环境的危害是不可估量的,防治化学实验室“三废”的污染迫在眉睫,采用合适的方式有效处理“三废”,力争问题的最终解决,真正实现化

学实验室绿色化。

参考文献:

- [1] 徐飞,李生英,王永红,等.无机化学实验教学中渗透绿色化学的探讨[J].甘肃科技,2006(7).
- [2] 大连理工大学无机化学教研室.无机化学实验.第 2 版[M].北京:高等教育出版社,2004.
- [3] 白林,李生英,徐飞.小量一半微量实验技术在无机实验中应用[J].甘肃高师学报,2001.
- [4] 戴树桂.环境化学[M].高等教育出版社,1997.
- [5] 李生英,白林,徐飞.无机化学实验[M].北京:化工工业出版社,2007.