

光子晶体光纤的特性及应用发展趋势

与普通光纤相比，光子晶体光纤具有超强抗弯曲、灵活的色散裁剪、良好的非线性和耐辐照等诸多灵活特性，从而展现出了广阔的发展前景。

江苏亨通光纤科技有限公司 | 陈伟

起源于1992年的光子晶体光纤具有普通光纤所不具备的新颖特性，如超强抗弯曲、灵活的色散裁剪、良好的非线性和耐辐照特性等，为光通信创新提供了广阔的想象与创新空间，将在光通信、光器件、光传感、先进激光等领域具有广泛的应用前景。

光子晶体光纤的起源

1992年，P.St.J.Russel首次提出光子晶体光纤（PCF）的概念。光子晶体光纤是指在垂直于光纤纵轴的横截平面内具有二维周期性的折射率结构，并且这种二维周期性结构在光纤纵轴方向上不变的光纤，光子晶体光纤最显著的特点是在光纤横截面上的周期性结构。

光子晶体光纤的结构与常规光纤迥然不同，普通的光纤是由实体的纤芯和包层构成的，而光子晶体光纤的包层由空气孔和石英构成，空气孔在纤芯的外围以正六边形的样子规则排列。石英-空气复合结构的光子晶体光纤大折射率反差、高度可控制的周期性折射率变化，为光的传导与控制提供了新的机理及途径。光子晶体光纤具有许多独特而神奇的物理特性：可控的非线性、无尽单模特性、可调节的奇异色散、低弯曲损耗、大模场等，这些特性是常规石英单模光纤很难或无法实现的，因此，光子晶体光纤引起了科学工作者的浓厚兴趣，并开展了深入的理论与试验研究。

1996年，英国南安普顿大学光电子学研究中心J.C.Knight等在《Opt.Lett.》

首次报道了所研制的实芯光子晶体光纤样品，并将4个不同波长的光源注入1米长的该光纤中，测试其近场与远场特性，证实了光在光子晶体光纤中的传导特性。1998年J.C.Knight等在《Science》首次报道“光纤中的光子带隙导波效应”，发现类似电子能带来的光子带隙效应，并制备出光子带隙型光子晶体光纤。1999年，R.F.Cregan等在《Science》首次报道“空气芯单模光子带隙光纤”。2003年，P.St.J.Russel在《Science》发表光子晶体光纤的论文，阐述了光子晶体光纤的新颖特性与应用前景。

光子晶体光纤的奇异特性

1. 超强的抗弯曲特性

光子晶体光纤采用空气与石英玻璃复合的材料结构，该结构可以大幅度提高纤芯与包层之间较大的折射率反差，这种结构可以很好地将光波电磁场严格限制在光纤芯中。图1是3种典型的结构的FTTH用光子晶体光纤。

这种空气与石英复合结构的新型光纤具有很强的抗弯性。其抗弯能力相比当前的G.657.B3光纤提升100倍以上，弯曲半径可以降低到2毫米以下，可以用于

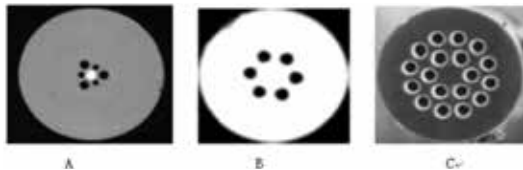


图1 3种不同结构的抗弯曲光子晶体光纤

高端有线制导领域。

2. 灵活的色散裁剪特性

改变光子晶体光纤中的空气孔大小与间距，光子晶体光纤的色散和色散斜率会急剧变化。如实心光纤的零色散点在1300nm波长附近，也可以通过设计将零色散点向长波长移动，但是难以获得短波长的零色散。光子晶体光纤可以实现传统实心光纤无法实现的短波长零色散特性、宽波段的色散平坦特性（如图2），以及超大负色散特性。

Huttunen等报道了一种具有高折射率纤芯的双芯光子晶体光纤，色散系数为 $-59000\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ ，并且能够实现105nm的宽带色散补偿。Huttunen还提出了一种有效面积为 $80\mu\text{m}^2$ 、内芯折射率为1.5、外芯折射率为1.3859的双芯光子晶体光纤，其1550nm的色散系数为 $-1600\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ ，补偿带宽达330nm，可实现整个C+L波段（1530nm~1625nm）的色散补偿。

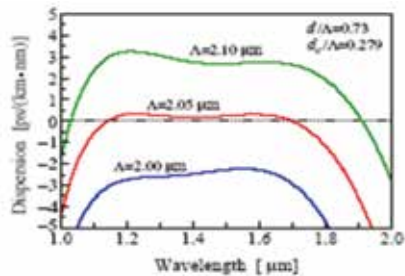


图2 不同结构的光子晶体光纤色散裁剪特性

3. 良好的非线性特性

高非线性光子晶体光纤的非线性系数是普通石英单模光纤的几十至几百倍，可以高达 $245\text{W}\cdot\text{km}^{-1}$ 。因此，在光子晶体光纤中不需要超快飞秒脉冲，所用脉冲泵浦的峰值功率可以低到次千瓦量级，这比常规光纤所需的

功率低1~2个数量级，在此情况下就可以产生较大的非线性频率变换和双倍程（400nm~1600nm）的超连续光谱（见图3）。另外，光子晶体光纤的色散特性具有较大的设计灵活性，保持



图3 非线性光子晶体光纤产生的超连续光谱

包层内空气孔间距不变而增大空气的填充比例就可以减小纤芯面积从而增强非线性效应,同时纤芯和包层之间极大的折射率差使得波导色散增大,结果零色散波长可以移至短波长波段(670nm~880nm),使得这些光纤特别适合采用掺钛蓝宝石激光或Nd3+泵浦激光光源的超连续光发生器。

4. 独特的光子带隙特性

更为神奇的是,光子晶体光纤还有一神奇的“变种”。如果去除光子晶体光纤的实心纤芯,换成“空心”就形成了类似于宇宙“虫洞”的时光隧道,大大减小了光纤传输的非线性效应、色散和损耗,可用于大功率激光传输、新型通信及光纤传感,图4是一种空心带隙型光子晶体光纤。

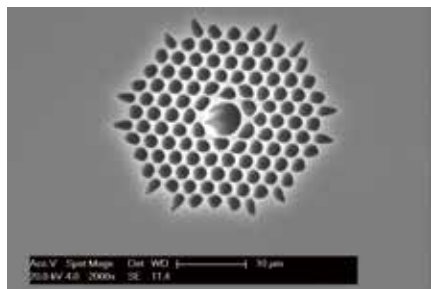


图4 空心带隙型光子晶体光纤端面

5. 良好的耐辐照特性

光子晶体光纤的纤芯可以不掺杂,实现纯二氧化硅的纤芯,因此该光纤可以具有很强的耐辐照性,在航空航天和光纤陀螺等领域有诸多应用。其中掺铒耐辐照光子晶体光纤采用空气包层进行设计,纤芯中掺铒,但是不引入具备色心特性的金属锗元素,大大提升了其在太

空中应用的耐辐照可靠性。图5是一种掺铒光子晶体光纤,其在1530nm的吸收为2.5dB/m,内包层数值孔径0.50。

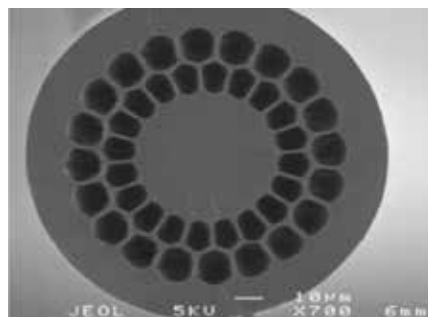


图5 掺铒耐辐照光子晶体光纤端面

6. 大模场特性

采用光子晶体光纤技术制造双包层掺铒光纤可以解决大有效面积与单模传输的矛盾,它可以根据激光器件的要求,设计制造纤芯掺杂浓度高、模场面积大、内包层数值孔径大,同时维持纤芯单模传输的高要求。

双包层掺铒光子晶体光纤的基本原理就是:内包层采用小占空比的空气微孔点阵,实现纤芯的单模传输,既能够实现较大的模场面积,减小高功率激光传输形成的非线性效应,又能够实现高光

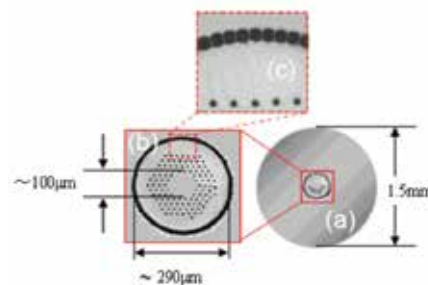


图6 超大模场的双包层掺铒光子晶体光纤的端面扫描

束质量的激光输出;外包层采用较大的空气孔,形成较大的折射率反差,从而增大内包层的数值孔径,提高泵浦光耦合效率,其内包层975nm的数值孔径可以达到0.9。而且外包层中分布着较大的空气孔,没有光辐射到光纤的涂层上,大大地提高了该光纤激光器的散热性能和耐热性能。

C.D.Brooks等对纤芯直径为100 μm、内包层直径290 μm、外包层直径1.5mm掺铒双包层光子晶体光纤(见图6),进行增益阶段的主振荡功率放大(MOPA)试验,获得了峰值功率4.5MW的单横模激光输出,光谱线宽20GHz,光束质量因子M2~1.3。该光纤是迄今为止报道的纤芯直径最大的双包层掺铒光子晶体光纤。

7. 空分复用特性

光子晶体光纤具有灵活的空间排布工艺技术,可利用光子晶体复用光纤技术制造空分多芯光纤,如双芯光纤、7芯光纤、19芯光纤等(见图7)。Jun Sakaguchi等利用长16.8km的7芯光纤、97路100GHz间隔的WDM波分复用通道、2路PDM传输86-Gb/s的QPSK信号,总速率达到109Tb/s。7芯光纤传输串扰很低,可以忽略不计。该实验首次突破了以往100Tbit/s的单纤传输容量限制,打破了原有的世界纪录,显现出作为未来大容量传输媒质的多芯光纤巨大潜力。该研究团队采用19芯光纤传输高达305TB/s的信号。

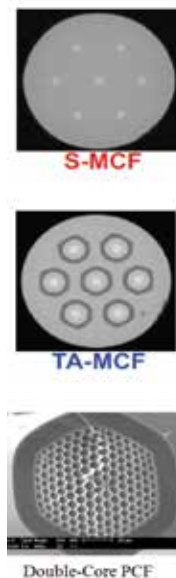


图7 3种多芯光子晶体光纤

光子晶体光纤的应用前景

1. 光子晶体光纤激光器

光纤激光器已经广泛应用于激光切割、激光焊接、激光钻孔、激光雕刻、激光打标、激光雷达、传感技术和空间技术以及激光医学等领域。国际上, 掺铋光纤激光器单根光纤已经实现了9600W的单模激光功率输出。2016年, 我国掺铋光纤激光器的单纤输出激光功率达到5kW。常规掺铋双包层光纤利用掺杂实现光纤包层与纤芯之间的折射率差, 使得维持单模传输的纤芯面积难以增加, 限制了双包层掺铋光纤激光器性能的进一步提高。

双包层掺铋光子晶体光纤的诞生, 可以解决大有效面积与单模传输的矛盾, 它可以根据激光器件的要求, 设计制造纤芯掺杂浓度高、模场面积大、内包层数值孔径大, 同时维持纤芯单模传输的高要求, 大大地提高了该光纤激光器的散热性能和耐热性能。2005年德国Jena公司采用双包层掺铋光子晶体光纤, 单纤获得了1530W的激光输出。

2. 光子晶体光纤放大器

铋镜共掺光子晶体光纤放大器是近年来光纤放大器的研究热点, 国外在该方面进行了大量的基础研究。Akira等将0.7nJ、700fs、47MHz、32mW的1557nm种子光注入到9米铋镜共掺双包层光子晶体光纤, 在7.1W的975nm泵浦光功率作用下, 在1550nm获得了100fs、74nJ、350mW的放大激光输出, 光束质量因子M2小于1.05, 表现出单横模特性。该铋镜共掺双包层光子晶体光纤的参数为: 晶格常数 $\Lambda = 22\mu\text{m}$, 占空比 $d/\Lambda = 0.54$, 空气外包层直径 $222\mu\text{m}$, 纤芯 Er^{3+} 和 Yb^{3+} 的浓度分别为140ppm和2000ppm, 模场直径 $26\mu\text{m}$, 纤芯数值孔径为0.04, 内包层数值孔径为0.58, 976nm泵浦吸收系数为1.6dB/m。

3. 超连续光谱与新型光源

超连续谱(SC)是高功率密度脉冲激光通过非线性介质产生的强烈光谱展宽, 利用光脉冲在光子晶体光纤中的自相位调制(SPM)、受激拉曼散射(SRS)以及四波混频(FWM)等非线性效应, 可使

输入脉冲展宽得到超连续谱, 在超连续光谱中取出特定波长的激光就可以制造不同波长的新型光源。超连续谱光源在飞秒激光脉冲的相位稳定、光学相干层析(OCT)、超短脉冲压缩、激光光谱学和传感技术等领域具有广泛的应用。

4. 光开关与传感器

光子晶体光纤由于具有较高的非线性效应, 包括自相位调制、交叉相位调制等, 利用该非线性效应可以研制高速、偏振无关的高性能集成化微型全光开关。全光开关是波长路由全光网络和下一代光网络的核心部件, P.Petropoulos等提出基于光子晶体光纤自相位调制效应的全光开关方案, J.E.Sharpring等提出基于光子晶体光纤的交叉相位调制效应的全光开关方案。

光子晶体光纤中分布着许多空气微孔, 将不同的液体、气体、固体材料填充到空气微孔中就可以制造出各种各样的传感器。Thomas Tanggaard等将液晶填充到PBG型光子晶体光纤的空气微孔中, 制造出一种全光传感器件, 该器件对温度非常敏感, 0.4°C 的温度变化就可以产生60dB的消光比, 是一种较好的温度传感器件或光开关。

5. 光刹车与全光通信

为了实现高速全光通信, 首先必须实现能够光速控制与光的存储。2005年1月, 美国康奈尔(Cornell)大学的Yoshitomo Okawachi等首次利用光纤中受激布里渊散射(SBS)非线性效应实现了可调谐的慢光时延, 通过调整泵浦激光波长可以调节被时延的波长, 通过调节泵浦光的光强可以实现时延的大小变化, 试验中实现了25ns的时延。

光纤中实现慢光是慢光研究历史上的里程碑, 它直接将慢光技术推向实际工程化应用, 充分发挥了光交换的快速高效特性。2007年12月, 美国杜克(Duke)大学的Daniel J. Gauthier等在《Science》上发表论文, 利用光纤中的受激布里渊散射(SBS)非线性效应, 成功进行了慢光的读写试验, 实现了慢光

的全光缓存技术, 这是全光通信史上的重大技术突破, 并且实现了6个归一化脉冲时延, 这是目前光纤SBS慢光的最大归一化时延。

展望未来, 光子晶体光纤将在如下几个领域取得突破性应用。

高速大容量长途传输: 光子晶体光纤具有灵活可裁剪色散特性, 可以制造出色散平坦、大有效面积, 同时具备无尽单模特性的光子晶体光纤, 并且可以制造出少模光纤和多芯光纤, 少模与多芯光子晶体光纤可望在Tbit/s超大容量的高速光纤通信领域实现应用。

宽带光源与波长变换器件: 超高非线性光子晶体光纤非线性系数是常规单模光纤的100倍以上, 能够实现1000nm的超连续光谱, 可以为光通信DWDM系统提供光源, 节省大量激光光源成本; 同时利用非线性实现的波长变化器件, 其灵活性是其它非线性光纤器件无法比拟的, 可以实现超跨度波长变换。

光载微波保密通信: 采用非线性光子晶体光纤与差频技术, 其保密功能非常强, 可以实现ROF通信。

高功率光纤激光器: 采用光子晶体光纤技术制造的大模场掺铋光子晶体光纤, 具备良好的抗热损伤能力, 同时激光光束质量好, 空气形成的内包层数值孔径较大, 大大提高激光二极管与光纤的耦合效率, 实现kW级激光输出, 在大功率切割焊接以及激光打标等领域具有广泛应用。

慢光与光存储: 利用光子晶体光纤的超高非线性效应, 可以实现光速减慢与光速控制, 这为未来的光存储与光交换奠定了技术基础, 也为全光通信提供了技术实现的新路径。

光子晶体光纤具有普通光纤所不具备的各种新颖特性, 其在光器件领域应用远远不止这些, 光子晶体光纤灵活而善变的新奇特性给科研工作者提供了更为广阔的想象与创新的空间, 预示着微结构光纤将会在光通信、光器件、光传感、先进激光等领域具有广泛的应用前景。