

新型光波导材料——光子晶体光纤

李启成

20世纪50年代,人类对电磁波的利用已到达了微波阶段。但在微波通讯技术远没有获得大规模应用的时候,比微波更短的电磁波(即光波)通讯技术都已经广泛应用了。光波通讯的载体是光纤。正当现在使用的普通光纤迅速普及的时候,人们于1996年研制出了第一个光子晶体光纤(Photonic crystal fiber简称PCF)。由于它奇异的传光特性,光子晶体光纤引起人们的极大兴趣。也许在不久的将来,光子晶体会成为新一代的光波导走进我们的生活。

光子晶体光纤的制作

根据目前的报道,光子晶体的制作都是经过拉伸、堆积和熔合等过程。如奈特(J. C. Knight)等的制作方法是:取一根直径为30mm的石英棒,沿其轴线方向上钻一直径是16mm的孔,随后将棒研磨成一个正六棱柱。将该石英棒放在2000℃的光纤拉丝塔中,将它拉成直径是0.8mm的细长的正六棱柱丝。把正六棱柱丝切成适当的长度,然后堆积成需要的晶体结构。把它们再一次放到拉丝塔中熔合、拉伸,使内部空气孔的间距减小到50μm左

右,形成更细的石英丝。在以上工作的基础上,把上述石英丝高温拉伸,形成最后的光子晶体光纤;在以上3个阶段的拉伸过程中晶胞减少了 10^4 数量级以上,最后,形成的光子晶体的孔间距在2μm左右。

光子晶体光纤沿着石英丝的轴向均匀排列着空气孔,从光子晶体光纤的横切面看,存在着周期性的二维结构。如果其中1个孔遭到破坏,或者孔径的大小变化、或者填充了其他物质、或者取消该孔(相当于用石英填充),如图1所示的光子晶体光纤的示意图,它的中心缺少一个空气孔而形成“纤芯”。该图也能反应出奈特等制作的光子晶体光纤的基本结构,只是他们的光子晶体光纤的横切面是正六边形。

光子晶体光纤的导光原理

在光子晶体光纤中(如图1),存在着两种截然不同的导光机制。第一种称为光子禁带导光机制,第二种称为全反射导光机制。下面对两种导光机制分别进行讨论。

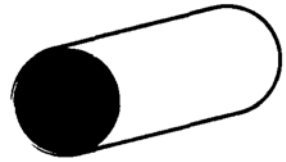


图1

还可将取石网通过十二指肠镜放入胆总管内再取出。这些使过去须作手术的患者免除了手术痛苦,尤其对不宜手术或不能耐受手术的患者,如年老体弱、手术危险性较大的病人提供了新的治疗措施。另外用食管窥镜注射硬化剂治疗食管静脉曲张;通过食管窥镜扩张食管的瘢痕狭窄;通过纤维结肠镜采用电凝圈套摘除结肠息肉及通过输尿管肾盂镜和经皮肾镜粉碎尿结石等。通过纤维支镜可查明原因不明的咯血,并可在镜下注射止血药,直接止血,止血效果显著;用纤维支镜抽取胸水;对支气管内痰液较多、咳出困难者,可用纤维支镜抽吸或用纤维支镜生理盐水灌洗后再吸出;对有肺不张患者,可在纤维支镜直视下吸引,有利于肺不张病人的肺复张;对肺癌并发气道阻塞患者,可在纤维支镜直视下适度治疗,缓解患者呼吸困难。

光纤的发展使激光通过内窥镜进入患者内腔,从而对疾病进行治疗。Ar⁺激光治疗器主要用于治疗上消化道出血。利用光纤将激光通过胃镜导入胃内,照射出血源,凝固出血。Nd³⁺:YAG激光内窥镜

能对较大和较深的血管进行热凝固,达到立即止血的目的。应用YAG激光内窥镜可以切除肠道多发性小息肉和广基亚蒂息肉。对晚期癌肿引起消化管的狭窄或梗阻,应用激光照射后可再通。总之,激光内窥镜不仅用于胃、十二指肠、直肠等消化道部位的治疗,而且在呼吸、泌尿等系统也有了重大突破。如气管缩窄、肺癌、尿道结石和膀胱肿瘤的治疗。

内窥镜激光激发某些光敏物质不仅可以诊断且可以治疗,因为光敏药物积聚较多的肿瘤细胞团吸收激光也多,因而使肿瘤细胞遭到破坏。如果用红光照射肿瘤中的血卟啉药物,它将被激发;借助能量传递,产生单态氧,单态氧是具有高反应性的瞬态分子,对含有血卟啉的细胞有“毒性”,但不伤害周围组织。燃料激光器和脉冲金属蒸气激光器被用作这一技术的光源。

随着现代科学技术的飞速发展,各种新型纤维内窥镜相继问世,可以预料纤维内窥镜在医学临床上会得到越来越广泛的应用。

(山东青岛大学医学院物理教研室 266021)

光子禁带导光机制:根据电子禁带的概念,人们在1987年提出了光子晶体禁带的概念。所谓光子晶体禁带是指某一能量范围内的光子不能通过光子晶体或在晶体内部不能传播。最初提出光子晶体概念的时候,希望利用光子晶体禁带效应导光。如图所示的一个空气孔缺失的结构存在着完全二维禁带,即一定频率范围内的光无法横向传播,只能沿轴向传播,这种禁带出现的条件有两个:一是空气孔的孔径与孔间距的比值不小于0.4,二是精确控制气孔的排列。因此,这种光子晶体制作出来工艺上有较大的难度。

全反射导光机制如图所示:中间的缺陷区相当于“纤芯”,而周围的周期性区域相当于包层,显然“纤芯”区的折射率大于“包层”区的有效折射率。只要满足全反射的条件光完全可以局限在“纤芯”范围内传播。有一点值得注意,满足光子禁带导光机制的光子晶体,也一定满足全反射导光机制。

光子晶体的特点

光子禁带导光机制的光子晶体光纤制作工艺的复杂性,使得人们目前制造和研究最多的是全反射型导光机制的光子晶体光纤。本文重点讨论全反射型光子晶体光纤的特点。

无休止的单模特性 虽然这种光子晶体光纤导光机制和普通光纤一样,却有普通光纤不具备的特点。光子晶体光纤在所有频率范围内支持单模特性。如果合理设计光子晶体光纤,这种光子晶体光纤具备在所有波长上支持单模传输的能力,即所说的无休止的单模特性。理论上已经证明:只要满足空气孔径与孔间距之比不小于0.2,就会有无休止的单模出现。

可以有较高的入射功率 光子晶体光纤的无休止单模特性与光纤的绝对尺寸无关,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”的面积。英国 Bath 大学的研究人员已经制作了工作在458nm的“纤芯”、直径是23 μm 的单模光子晶体光纤。其“纤芯”的面积大约是传统光纤纤芯面积的10倍,用于传输高功率的光时无须担心出现非线性效应。

光子晶体光纤的色散性质 光子晶体光纤具有奇异的色散特性。普通光纤是由多种材料制成,而光子晶体光纤完全可以由单一材料制成,因此“纤芯”和“包层”的力学和热学的性质是完全匹配的,也就是说“纤芯”和“包层”的折射率差不会因材料的不相容性而受到影响,从而可以在很长的波长范围内得到较大的色散。如光子晶体光纤能在很小的波长处获得反常色散,

同时保持单模,这是传统阶跃光纤无法做到的;即它的零色散点可以大幅度地向短波处推移,目前报道的单模的光子晶体光纤的零色散点已达到700nm左右。

在光子晶体中已成功产生850nm的光孤子,将来波长还可以降低。这就为制造可见光波段的光孤子光纤激光器提供了可能。我们还可以通过改变光子晶体中空气孔的分布和大小来剧烈地改变它的色散和色散斜率。目前,只能针对某种设计通过数值模拟得到其色散特性,伯克斯(Birks)等的分析表明,合理设计的光子晶体光纤可以获得100nm带宽,超过2000ps/nm·km的色散值,可补偿是自身长度35倍的标准光纤引起的色散。这预示着光子晶体光纤在未来超宽WDM的平坦色散补偿中可以起重要作用。现在,对光子晶体光纤的色散内在机理的认识还需进一步做工作。

光子晶体光纤的非线性现象 减少光纤的模场面积,可以增强非线性效应。从而使光子晶体光纤同时具备强非线性 and 快速响应的特性。现在的常规光纤有效截面积在50~100 μm^2 量级,而光子晶体光纤可以做到1 μm^2 量级,所以各种典型非线性光纤器件如克尔光闸、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 μm 波长处约为1~800 μm^2 。在孔中可以装载气体,也可以装载低折射率液体,从而使光子晶体光纤具有可控的非线性。

易于实现多芯传输 多芯传输有以下两个优点:一是提高了信道通信容量,二是解决了单芯难以胜任的复杂的通信网络、矢量弯曲传感、光纤耦合等问题。光子晶体光纤是通过堆积的方法制造的,使得多芯的结构能被精确地定位且具有良好的轴向均匀性,而无须附加其他工艺。现在有的科学家已在这方面做出了一些有益的探索,如:奈特等进行了该方面的理论研究,发现改变空气孔的比重或改变纤芯的位置可以获得具有不同耦合度的多芯光纤。

光子晶体光纤具有普通光纤不具备的优点,预示着光子晶体光纤将会有广泛的应用前景。光子晶体光纤的潜在应用包括超宽色散补偿、短波长光孤子传输/发生、光纤传感、极短拍长的偏振保持光纤、光子晶体天线、光学集成电路、超短脉冲激光器/放大器和光开关;当掺进非线性介质时,还可望用于光开关、光限幅、光双稳和光倍频等等。通过设计更加复杂的结构和不同的材料,还会发现更多的用途。

(哈尔滨黑龙江科技学院数力系 150027)