中国科学 E 辑：技术科学 2008 年 第 38 卷 第 5 期：807 ~ 816
www.scichina.com tech.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE IN CHINA PRESS

新一代塑料光纤及其功能开发

于荣金*，张冰

燕山大学信息科学与工程学院，秦皇岛 066004
* E-mail: r.j.yu@163.com

收稿日期: 2007-04-10; 接受日期: 2007-12-26
国家自然科学基金资助项目(批准号: 60444003, 60577009)

摘要 与石英光纤相比，塑料光纤的主要问题是传输损耗大. 采用一种新的光纤结构——蜘蛛网结构包层空芯布拉格光纤，可以把构成光纤材料的吸收损耗压缩至约 10^4~10^6 分之一，因而从根本上解决了塑料光纤损耗大的问题. 在此基础上，充分利用塑料光纤柔软、易弯曲的优点，可以实现从可见光至太赫兹波(0.4~1000 μm)所有波段信息和能量的低损耗传输. 新一代塑料光纤将成为普遍和大量应用的光纤.

关键词
塑料光纤
空芯布拉格光纤
蜘蛛网结构包层
可见光
红外光
太赫兹波
圆偏振单模

从十九世纪开始，人们就知道以全内反射机理来制作光的传输元件 [1]. 因此，利用光纤芯区材料折射率大于包层材料折射率在其界面形成全内反射来传输光有其悠久的历史和深刻的物理内涵. 不仅各种实芯光纤，包括液芯光纤和微结构包层实芯光纤，以及一部分红外空芯光纤，都是通过全内反射机理导光的. 另外，它对导光横向束缚具有高效性，例如，石英光纤按照 1966 年高锟等所指出的提纯材料之后，利用全内反射构成的光纤损耗，很快从 1000 dB/km 以上降至 20 dB/km，继而降至接近其理论极限(0.2 dB/km). 其实，另一种传光机理早在 1978 年就提出来了 [2]，即利用布拉格反射，可以在芯区折射率小于包层介质折射率的光纤中得到无损耗束缚传播. 但几年后被人否定 [3]，之后无多少人过问. 空芯布拉格光纤 [4]和空芯光子带隙光纤 [5]直到 1999 年才从实验上作了第一次演示.

与石英玻璃材料相比，塑料的重要优势是它的柔软性. 塑料的弹性极限高，可以制作直径在 1 mm 以上柔软的光纤. 而石英玻璃只有在很小直径(一般为 125 μm)才能保持光纤的柔软性. 石英玻璃固有的脆性需要对易碎的芯-包层结构加一个富有弹性的塑料涂层，以保护它的表面，并防止格里菲思裂纹扩展和顺向断裂. 因而在石英光纤包层上加一个塑料涂层(第 3 层)，已成为一根石英裸光纤的基本组成部分.

塑料光纤的研发，已有约四十年的历史，与石英光纤大致相同. 1966 年美国杜邦公司推出

了名为“Crofon”的第一个塑料光纤, 它是以聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)为纤芯的阶跃折射率(SI)型光纤, 后来生产的光纤损耗有所下降, 它的理论损耗极限值在可见光 650 nm波长处为100 dB/km, 实际产品的损耗达 150~200 dB/km, 比石英光纤在 1.55 μm波长处的损耗要大三个数量级, 而在近红外区损耗还要大. 因此, 以PMMA为芯或以聚苯乙烯(PS)为芯的塑料光纤产品主要用于装饰、照明、传感和短距离数据传输系统. 国际上, 特别是日本用了几十年的时间, 花费了大量的钱财, 想解决塑料光纤损耗大的问题, 其中找到最有效的办法, 是 20 世纪 80 年代用氘化PMMA[6], 90 年代用全氟化聚合物CYTOP[7]分别实现了损耗达 20 dB/km和低于 20 dB/km的水平. 然而, 因材料成本过高等原因, 至今没有进入市场和大量应用. 因而如何以一种新的方式有效解决塑料光纤损耗大的问题, 是一个世界性老大难问题.

依靠实芯的全内反射机理, 无法解决某些波长(如太赫兹波段)以及运用塑料来制作低损耗同时又低成本的光纤. 因为实芯光纤的传输损耗一般都大于(至少等于)构成光纤芯区材料的损耗. 面对这种问题, 必须采用空芯光纤结构, 而且空芯光纤的包层应具有很强束缚导波横向漏泄之能力. 我们通过多年努力, 终于在这方面取得了突破 [8].

1 空芯光纤

至今文献报道的空芯光纤, 大体可以分成 4 类. 1) 包层折射率大于芯区折射率的光纤. 在这种光纤中, 通过掠入射实现光的传输, 并伴随着辐射损耗, 所以是一种漏泄波导. 其实这种光纤就是一种毛细管. 光的损耗系数与 λ^2/a^3 成正比, 其中 λ 是辐射波长, a是光纤芯半径. 因此大多数场合采用具有大内径和短长度的这种空芯光纤. 例如通过飞秒激光的高次谐波上转换产生极紫外光, 就是用 10 cm长 150 μm直径充氩气的空芯光纤 [9]. 2) 由金属、玻璃或塑料管内表面淀积具有高反射涂层的空芯光纤. 其中有内壁材料折射率小于 1 的空芯光纤, 即包层的折射率小于芯区(空气)的折射率. 例如工作在 10.6 μm的蓝宝石和GeO_2等, 它们的折射率小于1, 构成衰减全反射(ATR)波导, 这种波导的损耗在 10.6 μm已低达 0.1 dB/m[10]. 3) 空芯光子带隙光纤. 它由许多石英玻璃(或有机玻璃等)毛细管以一定的周期结构排列成束, 在其中心去掉一根、七根或十九根毛细管形成纤芯(空芯), 然后拉制成所需尺寸的光纤. 周期包层形成光子带隙, 空芯中传输的光波如果正好落入包层光子带隙, 则它被包层束缚, 只能沿着光纤轴向传输. 在这种空芯光子带隙光纤中, 包层不仅要求微结构有严格的周期排列, 而且要求有相当大的空气填充分数. 按照我们用多极法所作的数值分析表明: 包层用 9 个空气孔环的空芯塑料(PMMA)光子带隙光纤, 其传输损耗可以比通常实芯的塑料光纤降低一个数量级 [11]. 实验上, 报道用石英玻璃材料制作的空芯光子带隙光纤, 其最低损耗在 1620 nm为 1.2 dB/km[12]. 这些光纤的最终损耗受由于冻结的表面张力波所造成的表面粗糙度决定. 现在1620 nm处1.2 dB/km的损耗似乎已经由这种机理处于支配地位. 在中红外区, 也制备出了二氧化硅材料的单模空芯光子带隙光纤 [13]. 4) 空芯布拉格光纤. 属于空芯布拉格光纤的有“全方位波导”光纤(“OmniGuide”fiber), 环形结构包层光纤, 以及蜘蛛网结构包层光纤(如图1所示). 在布拉格光纤中, 空芯是由高、低折射率材料交替层组成的一维布拉格反射器包围. 全方位波导光纤的包层是由两种折射率差很大的固体材料所构成(图 2(a)); 环形结构光纤的包层是由单一材料构成的, 其中用孔环作为低折射率层(图2(b)); 蜘蛛网结构光纤的包层是由单一材料构成的, 其中

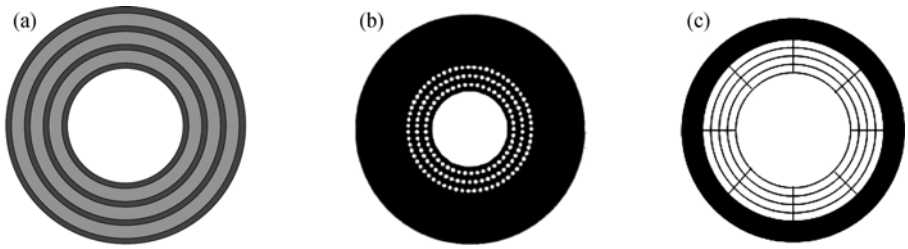

图 1 空芯布拉格光纤截面

(a) “全方位波导”光纤; (b) 环形结构包层光纤; (c) 蜘蛛网结构包层光纤

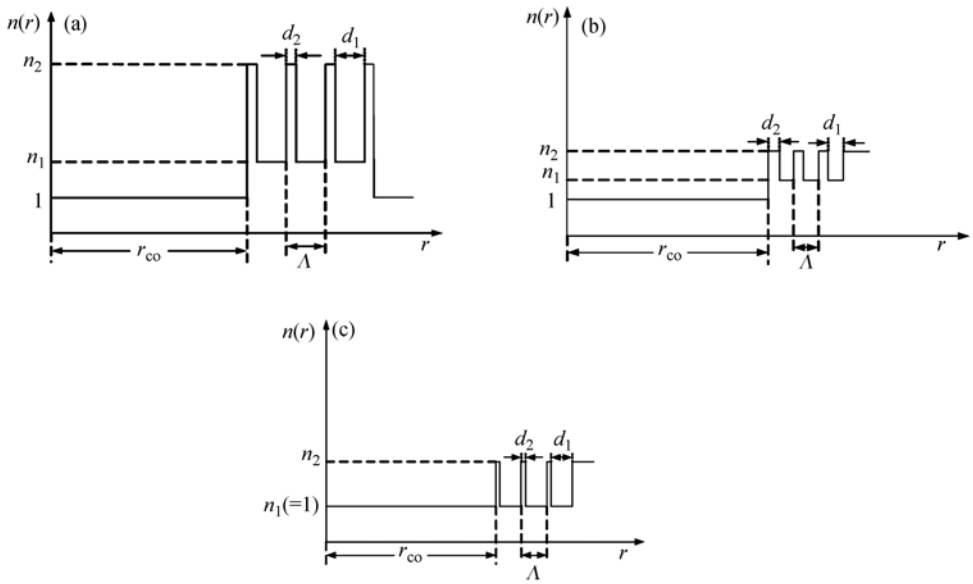

图 2 空芯布拉格光纤的折射率分布

(a) “全方位波导”光纤; (b) 环形结构包层光纤; (c) 蜘蛛网结构包层光纤

用空气层作为低折射率层(图 2(c)). 全方位波导光纤的传输损耗显著低于构成光纤材料的损耗, 用一种损耗为 30000 dB/m的材料构成全方位波导光纤时, 光纤的损耗为 0.65dB/m, 即光纤的损耗仅为构成材料损耗的 1/46000[14]. 且达到一定的漏泄速率只需要几层, 各模式之间漏泄很不相同, 产生一种模式滤波效应, 可以在大芯径下以单模方式工作 [15]. 不过在实际上, 要找到两种材料的折射率差比较大, 在热学和力学性能上、以及制作工艺上具有相似性、兼容性、简单可行性却十分困难. 因此, 至今只演示了两种材料组合, 即Te(n=4.6)和聚合物(n=1.59)组合 [16], 以及As_2Se_3(n~2.8)与PES(n~1.55)组合 [17], 工作波长都在 10.6 μm附近. 环形结构空芯光纤在红外(λ>1120 nm)已观察到传输损耗低于材料(PMMA)的损耗, 特别是在 1390 nm处, 材料损耗为 420 dB/m, 而光纤的传输损耗只有 40 dB/m[18]. 环形结构空芯光纤包层虽然只用单一材

料, 但其低折射率层是由含许多小孔的同一材料组成, 其折射率介于该材料的折射率与空气折射率(n=1)之间, 构成包层的材料折射率差没有蜘蛛网结构包层的材料折射率差大, 因而环形结构光纤对导波横向漏泄的束缚能力要小于我们提出的蜘蛛网结构光纤的能力.

2 蜘蛛网结构包层空芯布拉格光纤

我们在对所有空芯光纤, 尤其是近十年发展起来的空芯光子带隙光纤和二种空芯布拉格光纤进行深入分析的基础上, 搞清了它们对导波横向束缚的潜力以及优缺点, 提出了一种改进的包层结构——蜘蛛网结构包层空芯布拉格光纤 [19,20]. 通过使用支撑条, 可以解决介质层之间的结构支撑问题. 支撑条总是在圆截面上对称分布的, 并且使用与交替层相同的介质材料. 我们的研究表明, 由于支撑结构的引入, 场分布略有变形. 虽然支撑结构的引入有很小一部分功率会漏泄出去, 但只要支撑结构的参数选取适当, 损耗就会保持在一个很低的水平上, 并可以忽略支撑条的存在. 支撑条的数目和宽度应该尽可能小, 一般m(支撑条数目)=6~12, W_s(支撑条宽度)=λ/3~λ/30, 其中λ是光纤的传输波长.

设计蜘蛛网结构包层空芯布拉格光纤时, 与TE_{01} 模(最低损耗模)允许的归一化频率范围有关的一些重要结构参数、及其变化规律, 我们用平面波展开法作了分析 [21]. 这为蜘蛛网结构包层空芯布拉格光纤的设计, 提供了一般规律和基本依据.

3 新一代塑料光纤及其功能开发

过去几十年的塑料光纤都是由实芯构成并通过全内反射机理传光的, 一直被材料损耗大、因而光纤损耗大这个问题所困扰. 新一代塑料光纤采用蜘蛛网结构包层空芯布拉格光纤. 近一个时期我们对它的功能作了如下开发.

3.1 传输可见至近红外光的塑料光纤

1.3 和 1.55 μm近红外波段是目前光纤通信的主要波段. 在远距离、大容量的光纤通信干线以及海底光缆都是利用石英单模光纤. 而面对光纤通信向接入网发展, 尤其是光纤到家(FTTH), 采用石英单模光纤、多模光纤和多模硬塑料包层光纤(HPCF), 还是采用塑料光纤, 各界在认识上还没有完全统一. 究其原因, 现有的塑料光纤产品不是损耗大, 就是损耗较低但价格很贵; 过去强调塑料光纤芯径大、便于连接和对准、且可使用廉价的注塑连接器, 随着精密连接器元件费用暴跌, 这一优势也将丧失. 因此, 塑料光纤要在FTTH应用中取得优势, 必须降低损耗, 扩展使用波长(特别是近红外, 如 1.3m和 1.55 μm), 可满足当前和今后发展要求和价格便宜 [22].

我们应用渐近矩阵公式 [23]计算了蜘蛛网结构包层布拉格空芯光纤的损耗. 结构参数为纤芯半径(r_{co})=90 μm, 高折射率层厚度(d_2)=0.25 μm, 空气层厚度(d_1)=5 μm, n_2=1.49(PMMA), n_1 = 1(空气)和N(包层中交替层的数目)=3. 材料PMMA在波长 0.65, 0.85, 1.3 和 1.55 μm处的吸收损耗 [24]分别为 100 dB/km, 2.5×10^3 dB/km, 2.5×10^4 dB/km和 7.8×10^4 dB/km. 而TE_{01} 模在这些波长的传输损耗(结构束缚损耗加上材料吸收损耗)分别为 2.26×10^{-4}, 2.47×10^{-3}, 7.55×10^{-2} 和 0.465 dB/km. 考虑制作光纤时, 材料纯度问题、光纤结构的不均匀性以及支撑结构的影响等因素所

产生的附加损耗后, 还有很低的损耗和很宽的波长范围均可作为信号波长; 同时由于布拉格光纤的模式滤波效应, 在一定的光纤长度范围内, 可以实现单模. 在FTTH应用领域中, 一般优先采用无源光网络(PON), 特别是以太无源光网络(EPON)和千兆以太无源光网络(GEPON), 这些网络要求传输带宽和传输距离分别为 100 MHz~10 GHz和 100~10 km. 新一代塑料光纤完全能满足今后发展的需求, 可实现波分复用(WDM), 并具有低成本.

3.2 红外塑料光纤

一般可以把红外光纤规定为传输波长大于约 2 μm的光纤. 红外光纤的研究始于 1960 年, 第一根红外光纤是 20 世纪 60 年代中期从硫属化物玻璃制作的 [25]. 红外光纤在医学、工业、民用和军用等场所可获得广泛应用, 例如传输CO_2激光(10.6 μm), Er:YAG激光(2.94 μm)进行外科手术; 利用红外光纤传输黑体辐射进行温度测量, 或作为化学传感的有源和无源线路, 实现非接触温度监控和远距离光谱化学探测; 通过红外光纤传送高功率激光在工业上用于焊接和切割等; 军事上通过红外光纤传送的高功率激光能量实现反导弹防御等. 四十多年来, 为满足使用中对低损耗和高功率传输的需要, 国际上相继开发了各种材料和结构的光纤. 至今, 报道的红外光纤可大致分成 4 类: 1) 氟化物、锗酸盐、碲酸盐、硫化物玻璃实芯光纤; 2) 结晶卤化银实芯光纤; 3) 在金属、塑料或玻璃管内表面有高反射金属或介质涂层的空芯光纤; 4) 实芯光子晶体光纤和空芯光子带隙光纤.

其中研究得较多并适合拉制光纤的材料是氟锆酸盐玻璃(ZBLAN玻璃), 用此材料制备的实芯光纤, 在其传输窗口 2.55 μm波长处, 最低固有损耗为 0.024 dB/km, 实际制作出的光纤损耗要高约一个数量级. 美国海军研究实验室用改进的化学提纯和好的光纤制备技术, 使硫化物玻璃实芯光纤中红外的损耗值在约 500 m光纤长度降到只有 0.1~0.2 dB/m[26]. 用挤出法制备的结晶卤化银实芯光纤的损耗, 在 3 到 20 μm已降至小于 1 dB/m, 在 9 至 14 μm的中红外区已降至小于 50 dB/km[27]. 矩形金属管内表面有高反射介质涂层的空芯光纤在 10.6 μm损耗也降到了 0.1 dB/m[28]. 通过多次挤出卤化银($AgCl_xBr_{1-x}$)晶体材料, 制备出了中红外实芯光子晶体光纤 [29]. 用二氧化硅制作了一种空芯光子带隙光纤, 纤芯直径为 40 μm(由毛细管束中心抽掉 19 根毛细管形成)、总的外径为 150 μm、最近邻孔间距约 7 μm. 光纤的带隙峰位于 3.14 μm, 损耗约 2.6 dB/m. 通过结构的进一步优化, 损耗可达到 1 dB/m以下 [13]. 所有这些红外光纤, 虽然在一定应用范围内, 还能基本满足使用要求, 但从光纤的损耗、柔软易弯曲或价格方面, 还没有达到人们期望的状态.

我们采用蜘蛛网结构包层空芯光纤, 设计了两种红外塑料光纤(A, B). 结构参数为r_{co} = 1100 μm, n_1=1, n_2=1.52(聚乙烯), d_2=1.2 μm, d_1=24 μm和N=3(光纤A). 聚乙烯的吸收系数α在 10 μm波长处约为 50 cm^{-1}(相当于 2.17×10^7 dB/km)[30], 把材料的这个吸收值用于计算时, 数值模拟结果表明, 此光纤在 2.9 μm至 10 μm波长区TE_{01}模的损耗小于 23.5 dB/km; 在 4.09 μm波长处有最低损耗, 为 1.31 dB/km. 光纤B的结构参数为r_{co}=1400 μm, n_1=1, n_2=1.55(聚醚砜), d_2=2.8 μm, d_1=56 μm和N=3. 聚醚砜的吸收损耗为 3×10^7 dB/km, 把这个吸收值用于计算时, 数值模拟结果表明, 此光纤在 7.7 μm至 15 μm波长区TE_{01}模的损耗小于 29.9 dB/km; 在 9.9 μm波长处有最低损耗, 为 11.29 dB/km; 在 10.6 μm CO_2激光波长, 传输损耗为 11.79 dB/km. 这些结果说明:

尽管塑料在红外有强的吸收损耗, 但采用蜘蛛网包层空芯光纤, 仍可以获得比其他光纤更低的损耗.

3.3 传输太赫兹波塑料光纤

频率范围约在 0.1~10 THz的太赫兹(THz)波在光谱、成像、空间科学和信息传输等都有重要应用. 但现在大多数THz系统由于缺乏低损耗波导和透明材料, 还是依靠自由空间传播. 在THz波段, 即使是无源器件常用的材料——高阻硅, 它的吸收系数约达 0.04 cm^{-1}(相当于 17372 dB/km). 用高密度聚乙烯(HDPE)和聚四氟乙烯(Teflon)制作的光子晶体光纤, 它们的损耗系数分别为小于 0.5 cm^{-1}(0.1~3 THz)[31]和 0.12 cm^{-1} 左右 [32]. 内有Cu涂层的空芯聚碳酸酯波导, 从 3 mm芯直径光纤在 158.51 μm波长得到了 3.9 dB/m的最低损耗 [33]. 一种类似于光纤的亚波长直径(200 μm)塑料(聚乙烯)线, 在频率范围靠近 0.3 THz内, 损耗为小于 0.01 cm^{-1}[34]. 由此可见, 报道的最低损耗为 3900 dB/km, 离低损耗还差 2~3 个数量级 [35].

我们提出了一种用于太赫兹波光纤的设计. 光纤(A, B, C)的结构参数为r_{co}=10 mm, n_2=1.52(HDPE), n_1=1, d_2=25 μm, d_1=500 μm和N=3(光纤A); r_{co}=13 mm, n_2=1.52, n_1=1, d_2=70 μm, d_1=1050 μm和N=3(光纤B); r_{co}=17 mm, n_2=1.52, n_1=1, d_2=150 μm, d_1=2250 μm和N=3(光纤C). 按照文献HDPE在THz 波段的吸收损耗谱 [36], 计算的传输损耗如图 3 所示, 从图 3 中可以看出, 在光纤A中, TE_{01} 模在波长范围 65 μm至 240 μm内的传输损耗小于 5.86 dB/km, 在 90 μm处传输损耗最低, 为 0.46 dB/km; 在光纤B中, TE_{01} 模在波长范围 200 μm至 550 μm内的传输损耗低于 5.56 dB/km, 在 280 μm处传输损耗最低, 为 1.58 dB/km; 在光纤C中, TE_{01} 模在波长范围 420 μm至 1000 μm内的传输损耗低于 4.65 dB/km, 在 560 μm处传输损耗最低, 为 1.74 dB/km.

考虑到制作这种塑料光纤的构成材料和空气芯中可能会存在水份, 而水份的强吸收可能会使光纤损耗增加, 甚至某些波长会因水的吸收峰导致损耗过高而无法利用.

3.4 保持圆偏振态单模塑料光纤

在标准单模光纤中, 支持两个简并的正交偏振模(HE_{11} 模), 这种光纤在结构上的无规波动或者受外力作用都能产生不对称性, 破坏偏振简并性, 导致偏振模色散和干涉仪的偏振衰落. 而过去的保偏光纤, 如领结型、熊猫型等保偏光纤, 以及近几年发展的光子晶体高双折射光纤, 虽然取得了很大的进展, 但都是一种保持线偏振态的单模光纤. 这种光纤在相互连接时, 双折射轴需要精确对准, 如果两边保偏光纤主轴稍微错开了几度, 往往也会影响光纤网络系统的正常运行.

由于圆偏振光传输比线偏振光传输具有很多优点, 如圆偏振光传输可以给光纤连接、耦合和某些传感应用带来极大方便, 因此早在 1980 年, 法国光纤专家Jeunhomme和Monerie[37]提出过用圆偏振光取代线偏振光的设想. 20 世纪 70 年代末至 80 年代初, 曾有一种制备保持圆偏振光的方法, 它是在"冷"状态下将光纤硬行旋扭, 从而可以产生一定的保持圆偏振态功能, 但由于光纤玻璃材料的强度限制, 硬扭过头会使光纤断裂, 操作极不方便, 且硬扭状态难以保

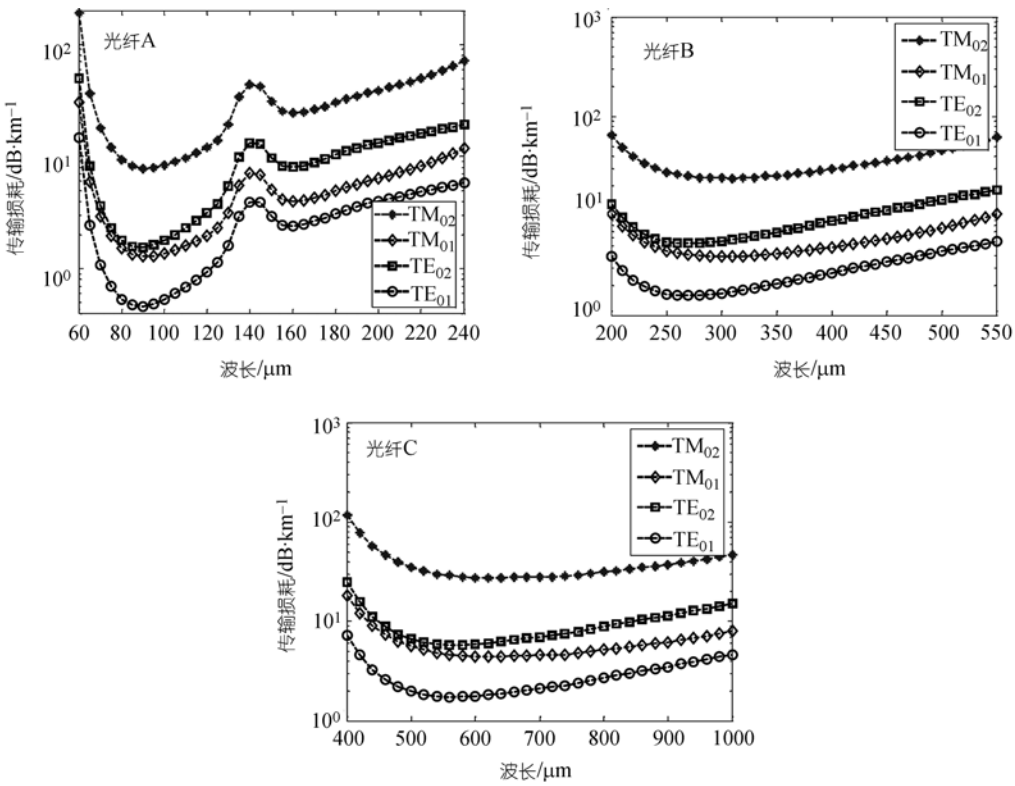

图 3 太赫兹波塑料光纤的传输损耗

持, 所以没有付诸大量实际应用. 20 世纪 90 年代上海大学黄宏嘉 [38]曾致力于这方面的研究, 提出了保持圆偏振态光纤及其制备方法: 在所用预制棒中含有一根或一根以上偏离中心轴线的应力作用柱体, 在光纤热拉丝过程中, 旋转此预制棒, 即将应力柱体拉成螺旋线, 从而制出所需的圆双折射光纤(即保圆光纤). 2004 年, Argyros等人 [39]报道了支持单偏振圆对称模的空芯环形结构布拉格光纤, TE_{01} 模的束缚损耗约为 0.83 dB/m, TE_{02} 模的束缚损耗约为 57 dB/m. 但是如果把TE_{01} 模在最低损耗波长 940 nm处材料PMMA的吸收损耗(约 4500 dB/km)考虑进去, 则TE_{01} 模的传输损耗太大, 单模传输长度很短, 因而无广泛实用价值.

我们计算了用聚碳酸酯构成的蜘蛛网结构空芯布拉格光纤. 光纤的结构参数为r_{co}=15 μm, n_1=1, n_2=1.585, d_2=0.21 μm, d_1=2.1 μm和N=3. 用渐近转移矩阵公式计算的束缚损耗如下: 在764 nm波长处, TE_{01} 模和TE_{02} 模的束缚损耗为 0.0136 dB/km(TE_{01})和 0.0991 dB/km(TE_{02}). 聚碳酸酯在 764 nm波长的本征损耗为 224 dB/km[40], 因此在 764 nm波长处TE_{01} 模(最低损耗模)和TE_{02} 模(第二个最低损耗模)的传输损耗分别为 0.0434 dB/km和 0.199 dB/km. 按照文献 [41]的计算方法, 此光纤约在 201 km与 460.8 km之间完全是单模的.

这种保持圆偏振态的低损耗单模光纤, 可以为光纤传感系统, 特别是先进的光纤陀螺以及今后相干光通信系统发展提供重要元件.

3.5 其他塑料光纤

利用塑料和蜘蛛网结构空芯布拉格光纤, 可以设计传送太阳光的空芯波导, 用于太阳光照明等, 它具有比原来实芯塑料光纤或光导管低得多的传输损耗, 显著提高传输效率; 可以设计用于充气空芯布拉格非线性光纤, 实现飞秒激光的高次谐波产生、受激转动拉曼散射、光孤子产生等, 在损耗、单模性和传输波长范围等性能方面, 超越现有各种空芯光子带隙光纤; 高强度、易弯曲、抗冲击、延伸率大和长寿命的塑料光纤, 可以在军事通信系统和光纤制导技术方面发挥作用.

4 制作技术

塑料光纤的制作技术, 大多采用连续挤出法和预制棒法. 前者效率高, 适合大批量工业生产; 后者适合制作渐变折射率型(GI)塑料光纤、光子晶体光纤和实验室试制样品. 预制棒法虽然不是连续工艺, 但灵活、多样、方便, 例如制作各种聚合物微结构光纤预制棒, 除使用毛细管堆积法外, 还可采用钻孔法、单体或预聚物注塑成型法、挤出法等.

蜘蛛网结构包层空芯塑料光纤, 既可以采用挤出法, 也可以采用预制棒法. 从大批量工业生产角度, 应采用连续挤出法. 连续挤出法在工业生产阶跃型塑料光纤的几十年历史中, 是成熟的. 但要生产布拉格空芯光纤, 主要技术难点是包层高折射率材料厚度仅为光波长的几分之一, 而现在挤出模具挤出料的最小厚度一般为 0.5 mm, 因此在短波段, 挤出模具尺寸要比光纤尺寸放大几百倍至上千倍. 如果模具挤出料的最小厚度可以降至 0.3 mm, 甚至 0.1 mm(国外已能做成产品), 这个难点就能消除. 另一方面, 从光纤设计上, 可以寻找低损耗蜘蛛网结构包层空芯塑料光纤的其他束缚机理, 增大高折射率包层的厚度, 问题也可解决. 预计批量连续化生产蜘蛛网结构包层空芯塑料光纤, 是一定能够实现的.

我们实验室正在采用预制棒法制作蜘蛛网结构包层空芯塑料光纤, 不久就能实现.

5 结论

利用各种塑料和蜘蛛网结构包层构成的新一代空芯塑料光纤, 开拓了在各种光波长、低损耗、单模、宽传输频率范围(1~2 个倍频程)、大芯径、易弯曲和低成本的光纤, 实现长距离、高速率信息传输; 利用耐热聚合物, 可以构成医用激光治疗仪、激光加工等所需要的传能光纤, 特别在红外区, 既具有低损耗又易弯曲的塑料光纤, 可以消除现有红外光纤的普遍缺憾. 像光纤直径大于几个毫米还具有弯曲性能的太赫兹低损耗波导, 塑料光纤可能是一种不可替代的光纤.

参考文献

1 刘德森, 殷宗敏, 祝颂来, 等. 纤维光学. 北京: 科学出版社, 1987. 1—3

2 Yeh P, Yariv A, Marom E. Theory of Bragg fiber. J Opt Soc Am, 1978, 68(9): 1196—1201

3 Doran N J, Blow K J. Cylindrical Bragg fibers: A design and feasibility study for optical communications. J Lightwave Technol, 1983, 1(4): 588—590

4 Yink Y, Ripin D J, Fan S, et al. Guiding optical light in air using an all-dielectric structure. J Lightwave Technol, 1999, 17(11): 2039—2041 [DOI]

5 Cregan R F, Mangan B J, Knight J C, et al. Single-mode photonic band gap guidance of light in air. Science, 1999, 285(5433): 1537—1539 [DOI]

6 Kaino T, Jinguji K, Nara S. Low loss pol (methylmethacrylate-d8) core optical fibers. Appl Phys Lett, 1983, 42(7): 567—569 [DOI]

7 Koike Y. Giga-island concept realized with high-speed GI plastic optical fiber. In: Proc Second Asia-Pacific Polymer Fiber Optics Workshop, Hong Kong, 2003. 4—7

8 于荣金. 全面解决塑料光纤损耗大的世界性难题. 见: 全国第二届塑料光纤、聚合物光子器件研究、生产和应用会议论文集, 秦皇岛, 2006, 1—6

9 Bartels R A, Paul A, Green H, et al. Generation of spatially coherent light at extreme ultraviolet wavelengths. Science, 2002, 297(5580): 376—378

10 Harrington J A. A review of IR transmitting, hollow waveguides. Fiber Integr Opt, 2000, 19(3): 211—227 [DOI]

11 Guan T S, Chen M Y, Zhang Z L, et al. Numerical smulation and analysis of losses in air-core plastic photonic bandgap fibers. Chin Opt Lett, 2005, 3(6): 313—315

12 Roberts P J, Couny F, Sabert H, et al. Ultimate low loss of hollow-core photonic crystal fibres. Opt Express, 2005, 13(1): 236—244 [DOI]

13 Shaphard J D, MacPherson W N, Maier R R J, et al. Single-mode mid-IR guidance in a hollow-core photonic crystal fiber. Opt Express, 2005, 13(18): 7139—7144 [DOI]

14 Dellemann G, Engeness T D, Skorobogatiy M, et al. Perfect mirrors extend hollow-core fiber applications. Photon Spect, 2003, 37(6): 60—64

15 Johnson S G, Ibanescu M, Skorobogatiy M, et al. Low-loss asymptotically single-mode propagation in large-core OmniGuide fibers. Opt Express, 2001, 9(13): 748—779

16 Yink Y, Ripin D J, Fan S, et al. Guiding optical light in air using an all-dielectric structure. J Lightwave Technol, 1999, 17(11): 2039—2041 [DOI]

17 Temelkuran B, Hart S D, Benoit G, et al. Wavelength-scalable hollow optical fibres with large photonic bandgaps for CO_2 laser transmission. Nature, 2002, 420(6916): 650—653 [DOI]

18 Argyros A, Eijkelenborg M A Van, Large M C J, et al. Hollow-core microstructured polymer optical fiber. Opt Lett, 2006, 31(2): 172—174 [DOI]

19 于荣金, 陈明阳. 蜘蛛网状空芯光纤. 中国发明专利, CN200510060031.7

20 Chen M Y, Yu R J, Tian Z G, et al. Optical and mechanical properties of hollow-core fibers with cobweb cladding structure. Chin Opt Lett, 2006, 4(2): 63—65

21 Huo L, Yu R J, Zhang B, et al. Design guideline of hollow-core fibres with cobweb cladding structure. Chin Phys Lett, 2006, 23(8): 2121—2124 [DOI]

22 Yu R J, Zhang B, Chen M Y, et al. A new solution of reducing polymer optical fiber losses. Opt Commun, 2006, 266: 536—540 [DOI]

23 Xu Y, Yariv A, Fleming J G, et al. Asymptotic analysis of silicon based Bragg fibers. Opt Express, 2003, 11(9): 1039—1049

24 Kaino T, Fujiki M, Jinguji K. Preparation of plastic optical fibers. Rev Elec Commun Lab, 1984, 32: 478—488

25 Kapany N S, Simms R J. Recent developments of infrared fiber optics. Infrared Phys, 1965, 5: 69—80

26 Sanghera J S, Aggarwal I D, Busse L E, et al. Chalcogenide optical fibers target mid-IR applications. Laser Focus World, 2005, 41(4): 83—87

27 Butvina L N, Dianov E M, Lichkova N V, et al. Crystalline silver halide fibers with optical losses lower than 50 dB/km in broad IR region and their applications. Proc SPIE, 2000, 4083: 238—253 [DOI]

28 Machida H, Matsuura Y, Ishikawa H, et al. Transmission properties of rectangular hollow waveguides for CO_2 laser light. Appl Opt, 1992, 31(36): 7617—7622

29 Rave E, Ephrat P, Goldberg M, et al. Silver halide photonic crystal fibers for the middle infrared. Appl Opt, 2004, 43(11): 2236—2241 [DOI]

30 Hidaka T, Morikawa T, Shimada J. Hollow-core oxide-glass cladding optical fibers for middle-infrared region. J Appl Phys, 1981, 52(7): 4467—4471 [DOI]

31 Han H, Park H, Cho M, et al. Terahertz pulse propagation in a plastic photonic crystal fiber. Appl Phys Lett, 2002, 80(15): 2634—2636 [DOI]

32 Goto M, Quema A, Takahashi H, et al. Teflon photonic crystal fiber as terahertz waveguide. Jpn J Appl Phys, 2004, 43(2B): L317—L319 [DOI]

33 Harrington J A, George R, Pedersen P, et al. Hollow polycarbonate waveguides with inner Cu coatings for delivery of terahertz radiation. Opt Express, 2004, 12(21): 5263—5268 [DOI]

34 Chen L J, Chen H W, Kao T F, et al. Low-loss subwavelength plastic fiber for terahertz waveguiding. Opt Lett, 2006, 31(3): 308—310 [DOI]

35 Yu R J, Zhang B, Zhang Y Q, et al. Proposal for ultra-low loss hollow-core plastic Bragg fiber with cobweb-structured cladding for terahertz waveguiding. IEEE Photon Technol Lett, 2007, 19(12): 910—912 [DOI]

36 Chantry G W, Fleming J W, Smith P M, et al. Far infrared and millimetre-wave absorption spectra of some low-loss polymers. Chem Phys Lett, 1971, 10(4): 473—477

37 Jeunhomme L, Monerie M. Polarisation-maintaining single-mode fibre cable design. Electron Lett, 1980, 16(24): 921—922 [DOI]

38 黄宏嘉. 保持圆偏振态的光纤和它的制备方法. 中国发明专利, CN92108598.2, CN92113821.0

39 Argyros A, Issa N, Bassett I, et al. Microstructured optical fiber for single-polarization air guidance. Opt Lett, 2004, 29(1): 20—22 [DOI]

40 Yamashita T, Kamada K. Intrinsic transmission loss of polycarbonate core optical fiber. Jpn J Appl Phys, 1993, 32(6): 2681—2686 [DOI]

41 Bassett I M, Argyros A. Elimination of polarization degeneracy in round waveguides. Opt Express, 2002, 10(23): 1342—1346