

紫外纯石英空芯微结构光纤的研究进展

庞璐, 张慧嘉, 宁鼎

(中国电子科技集团公司 第四十六研究所, 天津 300220)

摘要: 介绍了国际上先进的研究机构在紫外石英空芯微结构光纤方面的研究进展, 其中包括用空芯 Kagome 格子微结构光纤和包层只有一层空气孔的反谐振空芯微结构光纤实现紫外光的低损耗传输。迄今为止, 国际上报道的最佳结果是输出光纤为单模时, 从近红外到深紫外 270nm 波长范围内, 损耗都在 3dB/m 左右。

关键词: 紫外波段; Kagome 空芯微结构光纤; 反谐振空芯微结构光纤

中图分类号: TN913.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2018)03-0029-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.03.008

Research progress of ultraviolet pure silica hollow core microstructure optical fiber

PANG Lu, ZHANG Huijia, NING Ding

(The 46th Research Institute, CETC, Tianjin 300220, China)

Abstract: This paper introduces the research progress of the international advanced research group in the ultraviolet silica hollow microstructure fiber region, which including the use of the hollow core Kagome lattice microstructure fiber and the antiresonant hollow core microstructure fiber with only one layer of air holes to realize low loss ultraviolet transmission. So far, the best result of international reports is that when output fiber is a single mode, the loss is around 3dB/m from near infrared to deep ultraviolet 270nm wavelength range.

Key words: ultraviolet region; Kagome hollow core microstructure fiber; antiresonant hollow core microstructure fiber

0 引言

紫外激光在机械微加工和制造、医学治疗、紫外通信、军事制导探测等领域有广泛应用^[1-4], 所以研制在紫外波段能实现低损耗传输及低色散的光纤有重要的意义。

传统的紫外传输光纤为纤芯含有羟基(OH)的石英纤芯实心光纤, 这种实心紫外光纤在传输紫外高能脉冲激光时, 实心紫外光纤会产生非线性效应, 带来损耗、噪声和脉冲展宽等不利影响。针对实心紫外传输光纤非线性阈值相对较低的缺点, 科研人员提出了用空芯光纤传输高能紫外激光的思路^[5]。最初提出的空芯紫外光纤为在空芯中镀铝膜等在紫外波段反射

率高的介质, 对紫外光起到反射导引的作用。但是, 镀铝等介质膜需要进行复杂的化学气相沉积工艺, 而且这种镀铝的空芯紫外光纤弯曲损耗比较大。

在石英空芯微结构光纤中, 因为被传输的光的能量主要集中在空芯微结构光纤的空气芯里, 只有很少一部分光在石英材料中传输 (经过合理的设计后, 在石英材料中传输的能量可以占到整个传输的光能量的 1% 以下), 所以相对于常规光纤来说, 石英材料的空芯微结构光纤的吸收损耗也大为减少。本文介绍用空芯 Kagome 格子微结构光纤和包层只有一层空气孔的反谐振空芯微结构光纤实现紫外光的低损耗传输。

1 用空芯 Kagome 格子微结构光纤实现紫外传输

空芯微结构光纤是一类有新奇性质的光纤, 这类

收稿日期: 2017-09-05。

作者简介: 庞璐(1980-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为特种光纤及相关器件的研发。

庞璐,张慧嘉,宁鼎:紫外纯石英空芯微结构光纤的研究进展

光纤把电磁场限制在由微结构包层环绕的空芯内。自1999年英国 Bath 大学的 Cregan 等人设计制作第一根具有光子带隙效应的空芯微结构光纤以来^[9],空芯微结构光纤已经得到了长足的发展。科研人员最初研制出的空芯微结构光纤即基于光子带隙机理导光的空芯光子带隙光纤(又叫空芯光子晶体光纤),在某些波长和传播常数范围内,它的包层不能支持模式,芯里的光不能和包层模耦合,所以可以在芯里低损耗传输,其光纤截面图见文献[7]。后来科研人员又研制了空芯 Kagome 格子光纤,其光纤截面图见文献[8],这种空芯微结构光纤的导光带隙比空芯光子带隙光纤要宽,但是损耗比空芯光子带隙光纤要高。空芯 Kagome 格子光纤并不是基于光子带隙原理导光的,它是因为其芯模与包层模之间只有弱的耦合,从而使纤芯中传输的光不能泄露到包层中散失掉,所以只能在纤芯中传输,科研人员把这种导光机理称做低密度态光导引。这种光纤的导引机理也可由反谐振导引机理来解释:即在这种光纤的空芯纤芯界面的石英环和包层的石英网桥间形成了 Fabry-Perot 谐振腔。谐振波长的光从谐振腔里通过,反谐振波长的光被反射回来,可在空芯纤芯里传播。而且,谐振波长和包层里石英网桥模式的截止波长是一致的,所以在接近谐振波长的波长,光纤的总损耗明显增加;同时,两个连续的谐振波长间的损耗是相当低的(即传输窗口位于组成包层的石英桥中的空间模式的截止波长之间)。

对于前一种传统的空芯光子带隙光纤,要想使其在紫外区实现低损耗传输,通过其光子晶体结构尺寸的缩放定律,可推算出其光子晶体网格的节距大约为 $1\mu\text{m}$,这在空芯光子带隙光纤制备工艺上是很有挑战性的。这种光纤的最低损耗水平和 $1/\lambda_{\min}^3$ 成正比, $\lambda_{\min}$ 为最低损耗处对应的波长,因为该类型的光纤在近红外外的最低损耗约为 1dB/km ^[9],这意味着这种光纤在紫外区域(例如 $0.355\mu\text{m}$)的最低损耗会高达几 dB/m 。

但是,对于空芯 Kagome 格子光纤,在空芯纤芯中传播的电磁场和光纤材料的相互作用非常弱,所以在紫外波段这种石英材料吸收较高的波段,空芯 Kagome 格子光纤被期望能达到低于传统的空芯光子带隙光纤的损耗水平。

2009年,法国国家科研中心 Xlim 研究所的科研人员对导引紫外光的空芯 Kagome 格子光纤进行了研制^[10]。他们基于解释这种光纤导引机理的反谐振导引原理和由这个原理导出的包层里石英网桥模式的截

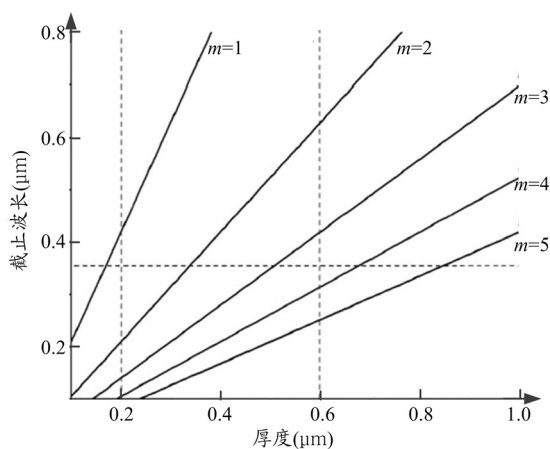


图1 在导模径向阶数 $m=1\sim 5$ 时,包层里石英网桥模式的截止波长 $\lambda_{c,m}$ 和包层里石英网桥厚度 t 的关系图^[10]

止波长公式 $\lambda_{c,m} = \frac{2t}{m} \sqrt{n^2 - 1}$ (n 代表石英的折射率, m 代表导模的径向阶数, t 代表包层中石英桥的厚度),对包层里石英网桥模式的截止波长 $\lambda_{c,m}$ 和包层里石英网桥的厚度 t 在导模径向阶数 $m=1\sim 5$ 时的关系进行了计算。计算的结果如图1所示^[10],当包层里石英网桥的厚度 $t=0.6\mu\text{m}$ 时,紫外 $0.355\mu\text{m}$ 波长可位于第4传输窗口;当包层里石英网桥的厚度 $t=0.4\mu\text{m}$ 时,紫外 $0.355\mu\text{m}$ 波长可位于第3传输窗口;当包层里石英网桥的厚度 $t=0.2\mu\text{m}$ 时,紫外 $0.355\mu\text{m}$ 波长可位于第二传输窗口。但是,包层里石英网桥的厚度越薄,工艺上越难实现。他们制备了石英网桥的厚度 $t=0.6\mu\text{m}$ 的空芯 Kagome 光纤,其光纤横截面图见文献[10],纤芯直径约为 $30\mu\text{m}$;用截断法对光纤的损耗谱进行了测试,测试结果显示在紫外波段的损耗大约为 2dB/m 的量级(损耗大的原因是石英网桥的厚度还不够薄),同时由于纤芯直径比较大($30\mu\text{m}$),所以探测到的光纤的模式是多模。这个测试结果是用一根处于弯曲状态的空芯 Kagome 光纤测试得到的,实验证明这种光纤弯曲半径大于 10cm 时,对弯曲是不敏感的。而且,经计算,这种光纤在 $0.355\mu\text{m}$ 波长的色散仅为几 ps/nm/km ,十分适合短脉冲紫外光的传输。除此之外,他们还理论计算预测了当石英网桥的厚度 $t=0.2\mu\text{m}$ 时,可以在紫外波段实现在带宽超过 100nm 的范围内损耗低于 1dB/m ^[10]。

2014年,德国 QUEST 研究所和马克思-普朗克光学研究所的科研人员,研制了纤芯直径约为 $20\mu\text{m}$ 的紫外空芯 Kagome 光纤,从而在紫外波段实现了单模输出。他们制备了纤芯石英壁厚度为 $240\pm 20\mu\text{m}$ (紫外

空芯 Kagome 光纤 A)和 $205\pm 15\mu\text{m}$ (紫外空芯 Kagome 光纤 B)两种紫外空芯 Kagome 光纤。他们对这两种光纤在波长为 280nm 时进行了损耗测试,光纤 A 的损耗为 3dB/m ,光纤 B 的损耗约为 0.8dB/m ,即纤芯石英壁厚度越薄,光纤损耗越低。之后,他们对紫外空芯 Kagome 光纤的弯曲半径也进行了测试,弯曲半径为 $20\mu\text{m}$ ^[11]。

2 用包层只有一层空气孔的反谐振空芯微结构光纤实现紫外传输

包层只有一层空气孔的反谐振空芯微结构光纤,因为包层只有一层空气孔,所以相较于包层为多层空气孔的传统空芯光子带隙光纤和空芯 Kagome 光纤制备起来更省时省力。2014 年,德国莱布尼兹(Leibniz)光子技术研究所研制了包层只有一层空气孔的双反谐振导引型空芯微结构光纤,光纤有一个正方形的空芯纤芯,纤芯边缘界面的长度为 $17.7\mu\text{m}$,厚度为 $0.56\mu\text{m}$,光纤直径为 $128\mu\text{m}$ 。这种光纤的实验测试损耗谱如图 2 所示,这种光纤可在最短 225nm 波长处实现传输。他们采用环模型(Ring Mode, RM)和扩展的环模型(Extended Ring Mode, ERM)对这种光纤的模式性质进行了分析。图 3 为用环模型和扩展的环模型模拟的这种光纤的损耗谱。在环模型中,由于把光纤外包层当作了空气,这并不能准确地反映出双反谐振导引型空芯微结构光纤的性质,而扩展的环模型考虑了光纤外包层同心的石英层,所以扩展的环模型是一个能准确反映双反谐振导引型空芯微结构光纤性质的分析模型^[12]。

比较图 2 和图 3,可发现在紫外波段实验测得的损耗值比理论值大很多,这是因为纤芯石英壁厚度的变化所致^[13]。

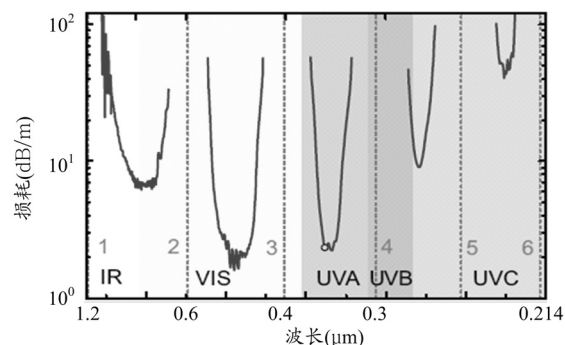


图 2 实验测试的损耗谱图

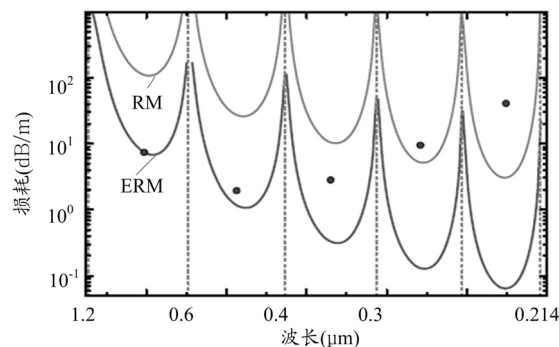


图 3 用环模型和扩展的环模型模拟的

包层只有一层空气孔的双反谐振导引型空芯微结构光纤的损耗谱

2015 年,德国莱布尼兹(Leibniz)光子技术研究所的科研人员又研制了纤芯直径为 $30\mu\text{m}$ 的覆盖紫外波段的大芯低损耗单模空芯微结构光纤。由于包层每一个气孔的大小与纤芯空气孔的大小相差不大(包层每一个气孔的面积和纤芯空气孔的面积之比约为 $58\%\sim 76\%$),所以纤芯中的高阶模的折射率和包层模的折射率比较接近,从而纤芯中的高阶模能量容易耦合到高损耗的包层模中消耗掉,最终使此种光纤实现了单模输出。从近红外到深紫外直到 270nm 波长处,损耗都在 3dB/m 左右^[14]。

表 1 报道的各种紫外空芯微结构光纤的试验测得的损耗

光纤类型	国家	模式	报道时间	光纤损耗	优缺点对比
空芯 Kagome 格子光纤	法国	多模	2009 年	在较窄的紫外传输波段; 大约 2dB/m 的量级	在较窄的紫外波段有适中的损耗, 但是在任意紫外波长都没有低于 2dB/m 的损耗
空芯 Kagome 格子光纤	德国	多模	2014 年	波长 280nm 附近; 0.8dB/m	在波长 280nm 处有相对低的损耗
双反谐振导引型 空芯微结构光纤	德国	多模	2014 年	波长 355nm 附近有最低损耗; 2dB/m , 可把紫外传输波段扩展到 225nm	紫外传输波段推进到更短的深紫外, 但是在任意紫外波长没有低于 2dB/m 的损耗
大芯空芯微结构光纤	德国	单模	2015 年	从近红外到深紫外 270nm 波长, 损耗都在 3dB/m 左右	使一个较宽的紫外波段保持损耗在 3dB/m 左右
“左轮”结构的 空芯微结构光纤	俄罗斯	多模	2016 年	在 250nm 波长处;大约 3dB/m	紫外传输波段窄,在紫外最低损耗也较高

2016年,俄罗斯科学院光纤光学研究中心的科研人员报道了他们制作的横截面类似“左轮”结构的空芯微结构光纤,几何参数为:光纤外径为 $73\mu\text{m}$,纤芯直径为 $15\mu\text{m}$,8个毛细管壁的厚度为 $590\sim 630\text{nm}$ 。该光纤在 250nm 波长处的基模损耗大约为 $3\text{dB/m}^{[15]}$ 。

最后,本文将报道的各种紫外空芯微结构光纤的试验测得的损耗汇总如表1所示。

3 结束语

传输和弯曲损耗低的紫外光纤是目前紫外激光传输、医学治疗和紫外通信急需的光纤。由于在石英中载入羟基(OH)能减轻紫外光辐照产生色心的影响,所以以前人们通常采用含有羟基(OH)的石英光纤作为紫外传输光纤。但是,这种实心紫外光纤在传输紫外高能脉冲激光时,当脉冲功率比较高时,实心紫外光纤会产生非线性效应,带来损耗、噪声和脉冲展宽等不利影响。随着光纤技术的发展,空芯微结构光纤成为了一条有希望实现在紫外波段低损耗、低非线性和低色散传输的技术途径。随着空芯微结构光纤技术的进步,相信空芯微结构光纤在紫外波段的传输带宽、传输损耗和色散将向更高的水平发展,最终会在实际应用中解决紫外波段低损耗、低色散传输的问题。

参考文献:

- [1] LEGGETT G J. Light-directed nanosynthesis: near-field optical approaches to integration of the top-down and bottom-up fabrication paradigms[J]. Nanoscale, 2012, 4(6):1840–1855.
- [2] HANLON E B, MANOHARAN R, KOO T W, et al. Prospects for in vivo Raman spectroscopy [J]. Phys. Med. Biol. 2000, 45(2):R1–R59.
- [3] ZHENG Y X, BRIAN M S. Ultraviolet Communications: Potential and

State-of-the- Art[J]. IEEE Communication Magazine, 2008, 46(5): 67–73.

[4] 刘菊,贾红辉,尹红伟. 军用紫外光学技术的发展[J]. 光学与光电技术, 2006, 4(6): 60–64.

[5] MATSUURA Y, MIYAGI M. Aluminum-coated hollow glass fibers for ArF-excimer laser light fabricated by metallorganic chemical-vapor deposition[J]. Applied Optics, 1999, 38(12): 2458–2462.

[6] GREGAN R F, MANGAN B J, KNIGHT J C, et al. Single-Mode Photonic Band Gap Guidance of Light in Air [J]. Science, 1999, 285: 1537–1539.

[7] COUNY F, BENABID F, LIGHT P S. Reduction of Fresnel Back-Reflection at Splice Interface Between Hollow Core PCF and Single-Mode Fiber [J]. IEEE Photonic Technology Letters, 2007, 19(13): 1020–1022.

[8] COUNY F, BENABID F, LIGHT P S. Large-pitch kagome-structured hollow-core photonic crystal fiber [J]. Opt. Lett, 2006, 31(24): 3574–3576.

[9] ROBERTS P J, SABERT F H, MANGAN B, et al. Ultimate low loss of hollow-core photonic crystal Fibres [J]. Opt. Express, 2005, 13 (1): 236–244.

[10] FEVRIER S, GEROME F, LABRUYERE A, et al. Ultraviolet guiding hollow core photonic crystal fiber [J]. Opt. Lett, 2009, 34(19): 2888–2890.

[11] GEBERT F, FROSZ M H, WEISS T, et al. Damage-free single-mode transmission of deep-UV light in hollow-core PCF [J]. Opt. Express, 2014, 22(13): 15388–15396.

[12] HARTUNG A, KOBELKE J, SCHWUCHOW A, et al. Double antiresonant hollow core fiber--guidance in the deep ultraviolet by modified tunneling leaky modes[J]. Opt. Express, 2014, 22(16): 19131–19140.

[13] HARTUNG A, KOBELKE J, SCHWUCHOW A, et al. Origins of modal loss of antiresonant hollow-core optical fibers in the ultraviolet[J]. Opt. Express, 2015, 23(3): 2557–2565.

[14] HARTUNG A, KOBELKE J, SCHWUCHOW A, et al. Low-loss single-mode guidance in large-core antiresonant hollow-core fibers [J]. Opt. Lett, 2015, 40(14): 3432–3435.

[15] PRYAMIKOV A D, KOSOLAPOV A F, ALAGASHEV G K, et al. Hollow-core microstructured 'revolver' fibre for the UV spectral range[J]. Quantum Electron, 2016, 46 (12): 1129–1133.

2018年中国(北京)海洋信息网络技术及产业发展大会会议通知及论文征集(一)

2018年5月22–24日 北京亦创国际会展中心

一 会议背景

我国是一个海洋大国,发展海洋信息网络是开发海洋经济、维护海洋安全的客观要求。在“一带一路”国家战略的布局下,在深化与“21世纪海上丝绸之路”沿线国家海洋经济合作等方面,中国企业迎来了“走出去”和“走向深海”的政策东风。“互联互通”是“一带一路”的最核心主题,这其中既包括了物理上桥梁铁路等基础设施建设的连通,也包含了跨境光缆建设、信息丝绸之路和国家通信畅通等内容,伴随着“互联网+”时代,云网一体化的飞速发展给海缆市场带来了巨大的机遇。

为构建一个开放的技术交流平台,汇集国内外优势力量,积极为我国海洋信息网络发展建言献策,特邀请国内科研、教学、生产、使用等单位的著名专家研讨海洋信息网络的技术与产业发展。围绕海底光缆通信网、海底观测网、海底警戒网、海底导航网及海洋施工装备,分析国内外现状和发展趋势,研究关键技术和标准规范,提出我国海洋信息网络的发展方向、研究重点与策略建议。