

# 反谐振空芯光纤及气体拉曼激光技术的研究进展

高寿飞, 汪滢莹\*, 王璞

北京工业大学激光工程研究院国家产学研激光技术中心, 北京 100124

**摘要** 反谐振空芯光纤(HC-ARF)具有宽传输通带、低传输损耗、高损伤阈值和高模式纯度等优势,在高功率脉冲激光传输及压缩、超快非线性频率变换、短距离高速大容量光通信、生物化学分析和量子存储等领域展现出广阔的应用前景。简要回顾了空芯光子晶体光纤(HC-PCF)的发展历程,重点介绍了近年来出现的几种新型 HC-ARF。对气体填充 HC-ARF 在新型拉曼激光频率变换应用领域中的关键技术及最新进展进行了讨论。

**关键词** 非线性光学; 空芯光子晶体光纤; 反谐振空芯光纤; 非线性频率变换; 拉曼激光

**中图分类号** TN253

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201946.0508014

## Research Progress on Hollow-Core Anti-Resonant Fiber and Gas Raman Laser Technology

Gao Shoufei, Wang Yingying\*, Wang Pu

National Center of Laser Technology, Institute of Laser Engineering,  
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

**Abstract** A hollow-core anti-resonant fiber (HC-ARF) has advantages such as wide transmission bandwidth, low transmission loss, high damage threshold, and high mode purity. The HC-ARF is widely applied in high-power pulse transmission and compression, ultrafast nonlinear frequency conversion, short-haul high-speed and high-capacity optical communications, bio-chemical analysis, and quantum storage. Herein, the development history of a hollow-core photonic crystal fiber (HC-PCF) was briefly reviewed, focusing on several new HC-ARFs that have emerged in recent years. In addition, the key technologies and the recent advances for the applications gas-filled HC-ARFs in the field of novel Raman laser frequency conversion were discussed.

**Key words** nonlinear optics; hollow-core photonic crystal fiber; hollow-core anti-resonant fiber; nonlinear frequency conversion; Raman laser

**OCIS codes** 190.5650; 060.2280; 060.5295; 140.3550

## 1 引言

空芯光子晶体光纤(HC-PCF)作为光纤光子学领域最重要的发明之一,自 1999 年研制成功<sup>[1]</sup>至今,其独特的科学研究价值和实际应用潜力极大地推动了现代光科学的进步,给激光、非线性光学、传感、通信、量子、生物等多个领域提供了理想的传输媒介和实验平台。一方面,HC-PCF 作为可弯曲的中空光导纤维,光在其中的传播性质类似于在自由空间中的传播,打破了固体介质材料吸收的限制,在光纤中创造出一个低色散、低非线性、低时间延迟的

理想光学环境;另一方面,HC-PCF 作为一个光与物质相互作用的平台(统称为“lab-on-a-fiber”),将激光约束在微米量级的中空纤芯内进行长距离传输,打破了激光空间传输衍射极限的限制,极大地增强了光与物质的相互作用。因此可以将许多以前在自由空间中进行的光与物质相互作用的实验搬到 HC-PCF 中来,在这样一个具有极长纵向距离和极小横截面积的光路中,许多微弱光学效应的强度可以很容易地被放大几个数量级,使得原先需要极端设备条件(如高功率激光器、高纯度实验耗材、大规模实验空间等)的光学效应可以轻易地被观测到,甚

收稿日期: 2018-10-31; 修回日期: 2019-03-29; 录用日期: 2019-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(61675011,61827820,61527822,61535009)

\* E-mail: dearyingyingwang@hotmail.com

至走向实际应用。例如,当人们在 HC-PCF 中充入氢气分子时,峰值功率为 kW 量级的脉冲激光能产生 45 条以上自发拉曼散射谱线组成的拉曼光频梳<sup>[2]</sup>,同样的效应在自由空间中则需要超过 1 GW 量级的激光峰值功率来产生,且也仅产生区区几条谱线。类似地,人们在 m 量级的 HC-PCF 中还观察到铷原子电磁感应透明<sup>[3]</sup>、铯原子精密光谱<sup>[4]</sup>、铯原子单光子存储<sup>[5]</sup>、氩气分子辅助的飞秒脉冲压缩<sup>[6]</sup>、氩气分子辅助的深紫外 Cherenkov 辐射<sup>[7]</sup>、维生素 B 分子光化学转换<sup>[8]</sup>、癌细胞分子微量探测<sup>[9]</sup>等一系列新奇的效应。可以说,作为一个同时拥有光纤链路和自由空间光路双重优势的光学平台,HC-PCF 可以在以 lab-on-a-fiber 为特点的光学应用中发挥其独特的优势。

本文以 HC-PCF 发展历程以及在非线性光学领域的重要应用为研究内容,通过调研近几年国内外在该领域的重要研究成果,分别介绍近年来出现的几种新型反谐振空芯光纤以及该类光纤在非线性拉曼频率转换领域的重要应用,主要包括篱笆状(Kagome)、负曲率、无节点、超低损耗连体管状的反谐振空芯光纤,以及气体拉曼频率转换在紫外和中红外波长方向的波长拓展。

## 2 反谐振空芯光纤研究进展

### 2.1 光子带隙与反谐振空芯光纤导光机理介绍

21 世纪初,HC-PCF 因具有低非线性、低色散、高激光损伤阈值、单模等优良的光学特性在短距离光通信、超快光学、非线性光学、量子光学、生物传感等领域得到广泛应用。早期的 HC-PCF 大多指基于“光子带隙”效应导光的光子带隙空芯光纤。在这类 HC-PCF 中,包层中周期性排列的空气孔和圆形石英柱结构形成了光子带隙,结构中心位置缺陷为空气形成的纤芯,带隙内的光波可完全被束缚在空气纤芯中。从理论上来说,“光子带隙”导光机理意味着只要光子晶体包层的周期数足够多,光在纤芯中的限制损耗就可以降到无限小。图 1(a)、(b)所示的是目前两款性能最优的光子带隙空芯光纤。然而,当 Mangan 等<sup>[10]</sup>于 2004 年将光子带隙空芯光纤的传输损耗在通信波段降到 1.7 dB/km 之后,这个纪录一直未被打破。2005 年 Roberts 等<sup>[11]</sup>的理论研究揭示出光子带隙空芯光纤的传输损耗还来源于表面散射。由于空气纤芯中传输的基模光场会有约 0.2% 的能量与纤芯周围的石英壁重叠,石英-空气表面的散射损耗决定了光子带隙空芯光纤的传输

损耗极限值约为 1.2 dB/km(在 1.5  $\mu\text{m}$  处),并且只能在约 20 nm 的带宽内实现。这是因为光子带隙空芯光纤还会受到表面模的影响,传输通带内会出现多个损耗峰,导致出现色散大、带宽窄[图 1(c)中虚线]的问题。在传输高功率超短脉冲激光时,光子带隙空芯光纤较大的表面散射还会造成严重的空芯光纤激光损伤。例如,对于皮秒量级的激光脉冲而言,光子带隙空芯光纤只能承受微焦量级的脉冲能量<sup>[12]</sup>。另外,为实现光子带隙空芯光纤在可见光波段的传输,要求其具备更小的包层空气孔和石英圆柱尺寸,这对于光纤拉制技术是一个非常大的挑战。目前仅有 NKT 公司在售的可见光传输的光子带隙空芯光纤在波长 400 nm 处的传输损耗高达 1500 dB/km,其传输通带仅为 70 nm<sup>[13]</sup>,而对光子带隙空芯光纤在紫外光波段的传输没有相关报道。这些本征性问题导致光子带隙空芯光纤无法在高功率超快激光传输、特殊波段激光传输、数据通信应用中展现出足够的优势,在 lab-on-a-fiber 的应用中不能满足更广泛的应用需求。

从 2008 年开始,光子带隙空芯光纤的表面模问题逐渐被克服,传输带宽扩展到了 160 nm<sup>[14]</sup>。但是,实现该结果的前提是紧挨着纤芯的一圈石英壁较薄,这增加了光纤拉制的难度,导致结构不均匀和传输损耗最低值只能维持在 3.5 dB/km 的水平<sup>[15]</sup>[图 1(c)中实线]。对于短距离通信而言,如此量级的传输损耗是可以接受的,并且 HC-PCF 特有的低延迟、低非线性、低色散等性质带来了更快的传输速度和更高的信道容量,图 1(c)中上方 S、C、L 分别对应光纤通信的短波、传统和长波通信带。但是,HC-PCF 的传输损耗仍然是光通信领域的学者普遍担忧的一个问题,也是决定 HC-PCF 能否在光通信领域发挥更大作用的重要因素。光子带隙空芯光纤受到 1.2 dB/km 的表面散射损耗的限制,要克服这一本征性问题,必须彻底摆脱光子带隙的导光机理。

空芯光纤中确实存在不同于光子带隙的导光原理。这可以追溯到 1986 年 Duguay 等<sup>[16]</sup>提出的反谐振式平面波导(ARROW)理论。直观地来说,反谐振原理就是要增强掠入射的光反射,从而将光尽可能地约束在波导芯子中。2002 年, Litchinitser 等<sup>[17]</sup>将 ARROW 原理应用到空芯光纤中,提出纤芯传输的光主要由包层中的石英壁厚决定,只有当石英壁厚满足谐振条件时,光才会被显著地泄漏掉。其谐振波长可以表示为  $\lambda_m = 2t \sqrt{n_2^2 - 1} / m$ ,其中  $t$  为石英壁厚,  $n_2$  为石英折射率,  $m$  为一个正整数。

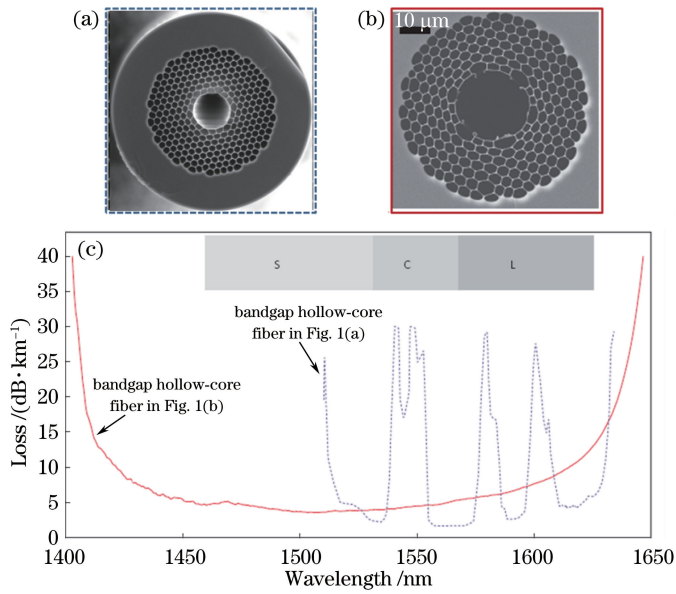


图 1 目前两款性能最优的光子带隙空芯光纤。(a)传输损耗低至 1.7 dB/km@1565 nm 的光子带隙空芯光纤<sup>[10]</sup>;

(b)在 160 nm 带宽内传输损耗为 3.5 dB/km 的无表面模带隙光纤<sup>[15]</sup>; (c)损耗图

Fig. 1 Two optimal photonic bandgap hollow-core fibers. (a) Photonic bandgap hollow-core fiber with transmission loss as low as 1.7 dB/km@1565 nm<sup>[10]</sup>; (b) non-surface-mode bandgap fiber with transmission loss of 3.5 dB/km over 160 nm bandwidth<sup>[15]</sup>; (c) loss plots

根据 ARROW 原理,通过设计光学谐振波长可以解决空芯光纤通光窗口过窄的问题。此后,人们把这类基于 ARROW 机理的空芯光纤称为反谐振空芯光纤。

ARROW 机理提出后很长一段时间内并没有得到广泛关注,其主要原因是缺乏定量化计算的能力。2014 年,Ding 等<sup>[18]</sup>针对简化的单层壁的反谐振空芯光纤进行了半定量化的解析计算。在泄漏模理论的帮助下,他们发现光纤式二维横截面结构存在着与片上波导式一维横截面结构不同的设计自由度。前者可以通过相位锁定效应对泄漏辐射的速度进行额外的有效调节。这一理论巧妙地解释了 2010 年 Wang 等<sup>[19]</sup>在实验中观察到的内摆线效应,并预示了成熟的泄漏模波导理论在解析设计反谐振空芯光纤光学属性方面的强大能力。2015 年,Ding 等<sup>[20]</sup>用半解析法设计出具有  $10^{-4}$  量级的双折射特性能力的反谐振空芯光纤。

除了宽带导光之外,反谐振空芯光纤的模场直径一般比光子带隙空芯光纤的大(20~100  $\mu\text{m}$ ),通常传导模场中 99.99% 的光强会与空气重叠(光子带隙空芯光纤中约为 99.8%),这使得抽运激光对光纤的损伤降低了 1~2 个数量级。另外,与光子带隙空芯光纤相比,反谐振空芯光纤的单模传输性能得到较大的提高<sup>[21]</sup>,这有利于对空芯光纤中光与物质的

相互作用的稳定控制。

## 2.2 Kagome 反谐振空芯光纤

最早的反谐振空芯光纤当属 2002 年 Benabid 等<sup>[22]</sup>报道的一款 Kagome 包层结构的空芯光纤,与光子带隙空芯光纤相比,该光纤中包层周期性排列的空气孔具有更大的间距[图 2(a)],同时能提供非常宽的导光通带,因此备受关注。Couny 等<sup>[2]</sup>和 Pearce 等<sup>[23]</sup>对 Kagome 空芯光纤的导光机理进行了分析,分别提出了两个理论:抑制耦合理论和反谐振理论,并都对光纤的传输通带进行了定性解释。同时,Kagome 空芯光纤的通光窗口进一步被扩展到 800 THz,为 lab-on-a-fiber 的应用打开了更为广阔的研究空间,但其光纤的传输损耗仍然高达 500 dB/km。

Wang 等<sup>[19,24]</sup>报道了一种新型内摆线纤芯形状的 Kagome 反谐振空芯光纤,通过在纤芯-包层界面上引入内摆线型结构[图 2(b)],大幅降低了纤芯模式与石英间的重叠,同时将空芯光纤在 1050~1400 nm 波长范围内的传输损耗降低至 150 dB/km。随后,继续优化内摆线形状的 Kagome 反谐振空芯光纤,其在不同波段的损耗不断降低。2012 年,Wang 等<sup>[25]</sup>将内摆线 Kagome 空芯光纤在 1.5  $\mu\text{m}$  通信波段的传输损耗降低至 40 dB/km,光纤的纤芯直径为 66  $\mu\text{m}$ ,传输通带为



1100~1750 nm。2013年, Debord等<sup>[26]</sup>将内摆线 Kagome反谐振空芯光纤在近红外波段1064 nm处的传输损耗降低至17 dB/km, 通过对比仿真和实验, 分析了内摆线形状的纤芯对光纤限制损耗的影响。同年, Bradley等<sup>[27]</sup>将内摆线 Kagome反谐振空芯光纤在波长780 nm处的传输损耗降低至70 dB/km, 光纤的纤芯直径为40 μm, 传输通带为750~850 nm。2014年, Debord等<sup>[28]</sup>将内摆线

Kagome反谐振空芯光纤在可见光波段的传输损耗降低至70 dB/km @ 600 nm和130 dB/km @ 532 nm, 光纤的纤芯直径为21 μm。如此低的损耗值已经超过了光子带隙空芯光纤在可见光波段的散射损耗极限值(500 dB/km<sup>[11]</sup>)。2017年, Wheeler等<sup>[29]</sup>报道了中红外波段通光的内摆线 Kagome反谐振空芯光纤, 其最低传输损耗为9.6 dB/km @ 2462 nm。

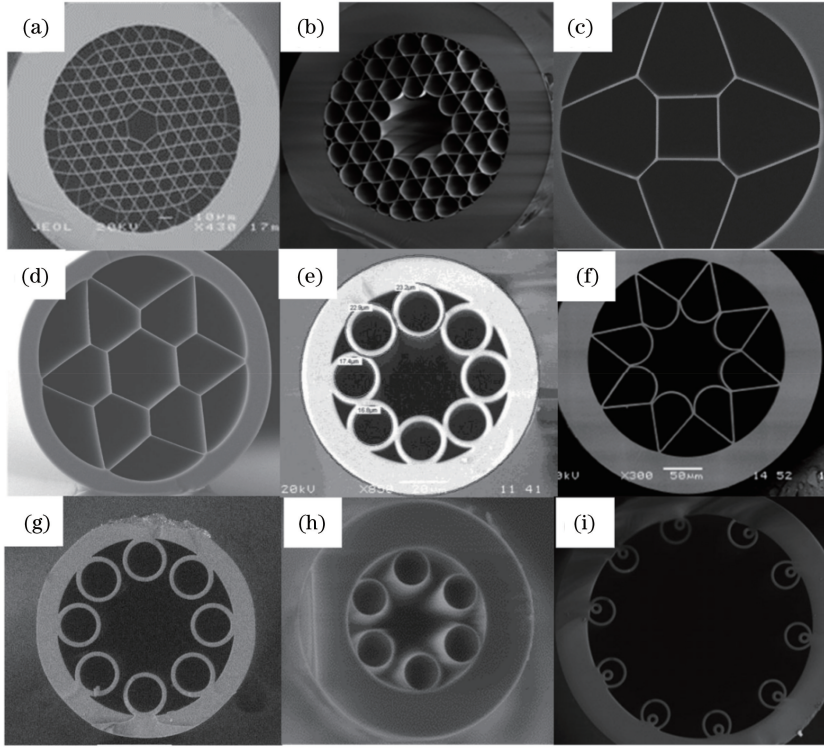


图2 各类反谐振空芯光纤(HC-ARFs)的扫描电子显微镜照片对比。(a)传统的六边形 Kagome反谐振空芯光纤<sup>[22]</sup>; (b)内摆线型 Kagome反谐振空芯光纤<sup>[25]</sup>; (c)紫外传输反谐振空芯光纤<sup>[46]</sup>; (d)性能改进的紫外传输反谐振空芯光纤<sup>[47]</sup>; (e)包层有节点的负曲率反谐振空芯光纤<sup>[30]</sup>; (f)负曲率单层反谐振空芯光纤<sup>[31]</sup>; (g)无节点反谐振空芯光纤<sup>[35]</sup>; (h)高性能无节点反谐振空芯光纤<sup>[38]</sup>; (i)嵌套管结构的反谐振空芯光纤<sup>[36]</sup>

Fig. 2 SEM images of various types of HC-ARFs. (a) Traditional hexagonal Kagome HC-ARF<sup>[22]</sup>; (b) hypocycloid Kagome HC-ARF<sup>[25]</sup>; (c) UV transmission HC-ARF<sup>[46]</sup>; (d) UV transmission HC-ARF with improved performance<sup>[47]</sup>; (e) negative curvature HC-ARF with cladding consisting of nodes<sup>[30]</sup>; (f) negative curvature single-layer HC-ARF<sup>[31]</sup>; (g) nodeless HC-ARF<sup>[35]</sup>; (h) high-performance nodeless HC-ARF<sup>[38]</sup>; (i) nested HC-ARF<sup>[36]</sup>

### 2.3 负曲率反谐振空芯光纤

随着内摆线 Kagome反谐振空芯光纤的光学性能不断被提升, 人们对其导光机理进行了更深入的研究, 逐渐意识到内摆线型 Kagome光纤成功的关键在于其内摆线形状的纤芯而不是 Kagome结构的包层。随后, 围绕纤芯内摆线(或负曲率)形状和单包层的设计理念, 结构更简单、光学性能更优异的反谐振空芯光纤不断涌现。2011年, Pryamikov等<sup>[30]</sup>设计了负曲率结构的反谐振空芯光纤[图2(e)], 并将其用于中红外3.5 μm波段的激光传输。但由于

光纤包层的石英壁非常厚, 传输谱非常窄, 其光学性能并没有得到大幅提升。

2012年, Yu等<sup>[31]</sup>对俄罗斯科学院 Pryamikov设计的负曲率反谐振空芯光纤的拉制工艺进行改进, 制备出了冰淇淋包层形状的负曲率反谐振空芯光纤, 如图2(f)所示, 光纤在中红外3050 nm的传输损耗为34 dB/km, 该值比石英材料在相同波段的吸收损耗低了3个数量级。2013年, 该研究小组拉制了多款负曲率反谐振空芯光纤, 对它们在800~4500 nm波段的传输损耗极限进行了探究<sup>[32]</sup>, 并测



得光纤在波长为 2400 nm 处有最低损耗值 (24.4 dB/km), 同时在波长 4000 nm 处的损耗为 85 dB/km, 而石英材料在此波段的吸收损耗高达 865000 dB/km。2015 年, Jaworski 等<sup>[33]</sup>对负曲率反谐振空芯光纤在可见光波段的传输特性进行了进一步探索, 测得光纤在波长为 571 nm 处有最低的传输损耗值 (95 dB/km), 同时在重要激光波长 515 nm 和 532 nm 处的传输损耗分别为 150 dB/km 和 180 dB/km。

综上所述, 负曲率反谐振空芯光纤和内摆线 Kagome 反谐振空芯光纤表现出大致同量级的传输损耗值, 同时也都表现出严重的弯曲损耗, 这些损耗与相邻孔洞的石英壁相互接触形成的节点引起的“Fano 共振”与泄漏效应有关<sup>[34]</sup>。于是, 研究者们将研究重点集中在如何消除这些接触点上。

## 2.4 无节点反谐振空芯光纤

2013 年, 俄罗斯科学院设计出了无节点结构的反谐振空芯光纤[图 2(g)], 并将其用于 2.5~7.9  $\mu\text{m}$  波段的光传输, 测得光纤在波长为 3.39  $\mu\text{m}$  处的损耗为 50 dB/km。与有节点的负曲率空芯光纤相比, 无节点结构的反谐振空芯光纤不仅可以大幅降低光纤的传输损耗, 而且可以使其损耗曲线变得更为平滑<sup>[35]</sup>。

2014 年, Belardi 等<sup>[36]</sup>针对无节点和有节点结构的反谐振空芯光纤的弯曲损耗特性进行理论分析和研究, 发现当去除反谐振空芯光纤包层的节点时, 可以有效降低空芯光纤的弯曲损耗。2015 年, Belardi 等<sup>[37]</sup>对这种无节点结构的反谐振空芯光纤进行控制, 该光纤在近红外区域表现出跨倍频程的传输带宽, 传输范围为 750~1600 nm。

近几年, 无节点反谐振空芯光纤的控制取得了突破性的进展, 德国马普所的 Uebel 等<sup>[21]</sup>和北京工业大学研究小组的 Gao 等<sup>[38]</sup>几乎在同一时间拉制出结构理想的无节点反谐振空芯光纤[图 2(h)], 并且光纤包层都采用了一层 6 个薄壁毛细管。不同的是, Uebel 等对这种光纤在绷直状态下的单模性质进行了研究, 而 Gao 等还证实了其弯曲损耗远小于有节点的反谐振空芯光纤, 在传输通带内长波长方向、弯曲半径为 5 cm 的情况下, 其弯曲损耗为 200 dB/km, 在短波长方向、弯曲半径为 2 cm 的情况下, 其弯曲损耗为 4500 dB/km。

紧接着, 无节点反谐振空芯光纤在激光传输、低传输损耗和宽传输带宽方面的优势不断被报道。2016 年, Michieletto 等<sup>[39]</sup>利用该光纤实现了高功

率超短脉冲激光传输, 其脉宽为 22 ps, 输出的平均功率超过 70 W; 2017 年, Gao 等<sup>[40]</sup>通过优化控制参数和减小石英壁的厚度, 实现了无节点反谐振空芯光纤在可见光至近红外波段 (420~1400 nm) 的跨倍频程传输, 并进一步验证了 532 nm 绿光高功率超快皮秒激光传输; 同年, Debord 等<sup>[41]</sup>报道了无节点反谐振空芯光纤在传输损耗上的优势, 利用第二阶传输带得到了波长 750 nm 处 7.7 dB/km 的传输损耗; 几乎同一时间, Hayes 等<sup>[42]</sup>报道了在近红外波段跨倍频程传输的无节点反谐振空芯光纤, 其传输损耗约为 20 dB/km, 该光纤可用于低时间延迟光通信。随后, Gao 等<sup>[43-44]</sup>又进一步拉制了中红外波段跨倍频程传输的反谐振空芯光纤, 并利用近红外的 1  $\mu\text{m}$  皮秒超快激光, 抽运充有甲烷气体的空芯光纤, 得到中心波长为 2.8  $\mu\text{m}$  的高峰值功率的拉曼激光输出<sup>[44]</sup>。

然而, 在紫外波段一直没有出现高性能的空芯光纤, 即使已报道的光纤也表现出非常高的传输损耗。2009 年, Février 等<sup>[45]</sup>报道了 Kagome 反谐振空芯光纤在紫外 355 nm 处的光传输, 损耗为 2000 dB/km, 并且输出的模式具有很多的高阶模。2014 年, Hartung 等<sup>[46]</sup>设计的一款紫外单模传输的反谐振空芯光纤[图 2(c)], 在紫外波段表现出三个反谐振传输带, 其损耗从最低的 2400 dB/km @ 348 nm 逐渐增加到 9100 dB/km @ 276 nm 和 49700 dB/km @ 231 nm。2015 年, Hartung 等<sup>[47]</sup>继续优化光纤设计并拉制了另外一款性能改良的反谐振空芯光纤[图 2(d)], 其在紫外波长 270~310 nm 的平均传输损耗被降低至 3000 dB/km。同时, 反谐振空芯光纤在深紫外激光传输上表现出优异的特性。Gebert 等<sup>[48]</sup>利用 Kagome 反谐振空芯光纤在波长为 280 nm 传输平均功率为 15 mW 的激光, 连续工作时间大于 100 h 后, 没有观察到紫外辐照引起的空芯光纤损伤, 但是光纤的传输损耗高达 800 dB/km。

2018 年, Gao 等<sup>[49]</sup>设计并拉制了两款低损耗紫外传输的无节点反谐振空芯光纤, 并在波长为 355 nm 处实现了长时间稳定的高能皮秒脉冲激光传输。第一款光纤在紫外到可见光波段展现出三个传输通带, 其在 300, 375, 515 nm 的传输损耗分别为 130, 170, 300 dB/km; 另外一款空芯光纤可以同时覆盖三个重要激光波长 (266, 355, 532 nm), 在 355 nm 和 532 nm 传输带的损耗分别约为 300 dB/km 和 900 dB/km。同年, Yu 等<sup>[50]</sup>将无节点反谐振空芯光纤在 266 nm 波段长时间的传输特性

与实芯石英抗紫外辐照光纤的传输特性进行对比,也没有观察到无节点反谐振空芯光纤传输效率降低和紫外辐照引起的光暗化情况。

### 2.5 超低损耗的反谐振空芯光纤

反谐振空芯光纤从 2002 年问世至今已有十几年的时间,然而只在最近几年才取得较大的研究进展。随着对其导光机理的深入研究,人们对反谐振空芯光纤有了更清晰的认识,结构更简单、性能更好的光纤不断地被设计出来。Kagome 空芯光纤中的内摆线纤芯结构有效地降低了反谐振空芯光纤的传输损耗。随后出现的单层负曲率反谐振空芯光纤使人们开始意识到 Kagome 包层结构对光纤的特性并没有起到很重要的作用。后来出现了单层无节点反谐振空芯光纤,其去除包层的节点大大改善了光纤的弯曲损耗和传输带宽特性。更重要的是,与光子带隙空芯光纤相比,反谐振空芯光纤具有更大的纤芯,且其与石英的光场重叠更小(0.01%),因此,反谐振空芯光纤的表面散射损耗比光子带隙空芯光纤

的至少低一个数量级,而且无节点结构的反谐振空芯光纤的传输损耗已被降低至 7.7 dB/km。最近,已有多组研究小组给出了多层反谐振的结构设计(图 3),其仿真结果和理论分析都预言了 0.1 dB/km 以下的总损耗值(包含了限制损耗和表面散射损耗)<sup>[51-54]</sup>,这意味着反谐振空芯光纤的理论损耗极限低于光子带隙空芯光纤的和石英光纤的(0.14 dB/km)。例如, Poletti<sup>[51]</sup>设计的一款嵌套石英管包层结构的反谐振空芯光纤,通过仿真发现该光纤具有超低的限制损耗,并低于光纤的表面散射损耗,同时该光纤还表现出超低的弯曲损耗。2015 年, Belardi<sup>[37]</sup>对嵌套管反谐振空芯光纤[图 2(i)]进行了拉制,该光纤在可见光波长为 480 nm 处的传输损耗为 175 dB/km,但由于包层内侧石英管壁厚远大于外侧石英管壁厚,因此光纤并没有表现出超低的传输损耗。虽然对这些光纤结构的拉制存在很大的难度,离真正实现超低损耗尚有一段距离,但多个研究小组正在积极尝试。

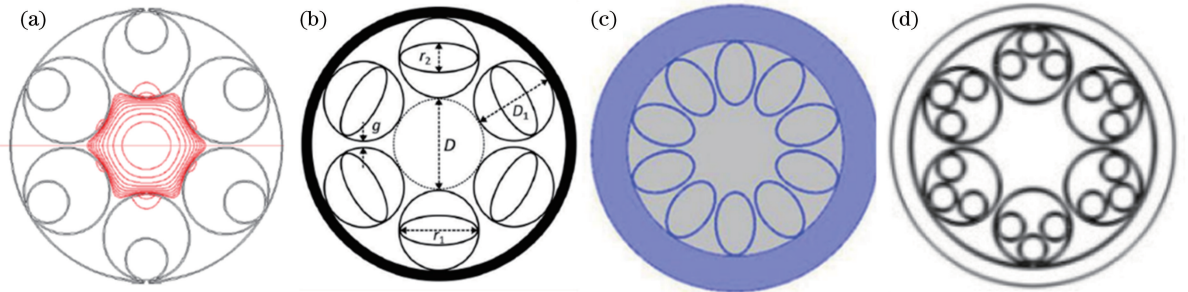


图 3 超低损耗反谐振空芯光纤。(a)嵌套管结构的反谐振空芯光纤<sup>[51]</sup>; (b)嵌套椭圆管结构的反谐振空芯光纤<sup>[52]</sup>; (c)单圈椭圆管反谐振空芯光纤<sup>[53]</sup>; (d)嵌套三个圆管结构的反谐振空芯光纤<sup>[54]</sup>

Fig. 3 Ultra-low loss HC-ARFs. (a) Nested HC-ARF<sup>[51]</sup>; (b) nested elliptical element HC-ARF<sup>[52]</sup>; (c) single ring-elliptical-tube HC-ARF<sup>[53]</sup>; (d) nested three-adjacent-tube HC-ARF<sup>[54]</sup>

2018 年, Gao 等<sup>[55]</sup>设计了一种新型连体管状反谐振空芯光纤[图 4(a)],理论预测和数值仿真显示,包层石英管内具有两个玻璃片结构的连体管状反谐振空芯光纤具有低至 0.1 dB/km 的传输损耗极限<sup>[4(b)]</sup>。实验对包层石英管内具有一个玻璃片结构的连体管状反谐振空芯光纤进行了拉制,测得光纤在波长 1512 nm 处具有 2 dB/km 的超低传输损耗,同时该光纤还表现出宽传输通带(横跨 O、E、S、C 和 L 通信带)、低弯曲损耗和高模式质量等优点,这些优点有利于超低损耗反谐振空芯光纤的研制。同年, Bradley 等<sup>[56]</sup>对嵌套石英管包层结构

的反谐振空芯光纤进行进一步优化,测得光纤在波长 1450 nm 处的传输损耗为 1.3 dB/km,该结果是目目前 HC-PCF 报道的最低损耗值。

自 1999 年第一根 HC-PCF 问世至今, HC-PCF 每一次于损耗或者带宽上的突破都在光学领域引起了巨大反响,并推动了多个相关光学领域的巨大发展。一旦 HC-PCF 真正实现超低损耗的目标,必将触发光纤光学工业的重大变革,并对信息和量子等未来战略性技术领域产生深远影响。目前,国内外主流研究机构对不同波段处传输的反谐振空芯光纤的研究进展总结见表 1。

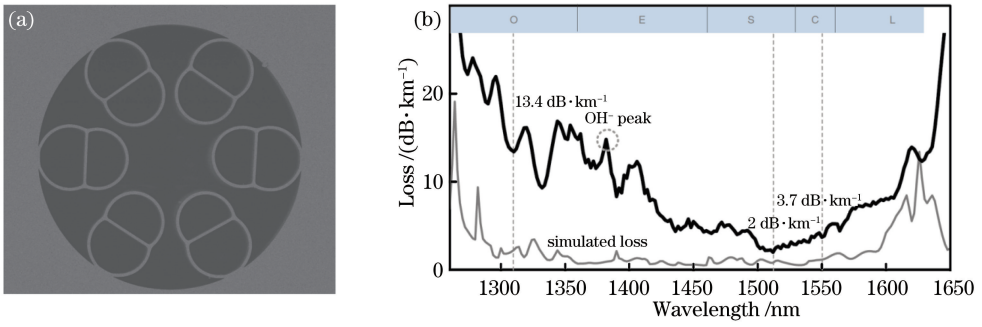


图 4 超低损耗宽带连体管状反谐振空芯光纤。(a) 连体管 HC-PCF 的扫描电子显微镜图片；  
(b) 测量(黑色曲线)和仿真(灰色曲线)的损耗<sup>[55]</sup>

Fig. 4 Ultralow-loss broadband conjoined-tube HC-ARF. (a) SEM image of conjoined-tube HC-PCF;  
(b) measured loss (black) and simulated loss (grey)<sup>[55]</sup>

表 1 不同波段处传输的反谐振空芯光纤的研究进展

Table 1 Research progress on HC-ARF for different spectral ranges

Transmission band /nm	Different types of HCFs	Minimum loss and wavelength	Core diameter / $\mu\text{m}$	Research department	Time
UV	Kagome	2000 dB/km @ 355 nm	30	University of Limoges	2009 <sup>[45]</sup>
	Kagome	800 dB/km @ 280 nm	18.7	QUEST Institute	2014 <sup>[48]</sup>
		2400 dB/km @ 348 nm		Leibniz Institute of Photonic Technology	2014 <sup>[46]</sup>
	Square	9100 dB/km @ 276 nm	17.7		
		49700 dB/km @ 231 nm		Leibniz Institute of Photonic Technology	2015 <sup>[47]</sup>
	Hexagon	300 dB/km @ 300 nm	30		
		3250 dB/km @ 258 nm		Russian Academy of Sciences	2016 <sup>[57]</sup>
	Nodeless	1900 dB/km @ 310 nm 1550 dB/km @ 393 nm	15		
	Nodeless	130 dB/km @ 300 nm 170 dB/km @ 375 nm	15	Beijing University of Technology	2018 <sup>[49]</sup>
	Nodeless	100 dB/km @ 218 nm 260 dB/km @ 355 nm	17	University of Bath	2018 <sup>[50]</sup>
Visible	Hypocycloid-core	70 dB/km @ 600 nm 130 dB/km @ 532 nm	21	University of Limoges	2014 <sup>[28]</sup>
	Kagome			University of Bath	2015 <sup>[33]</sup>
	Negative curvature	95 dB/km @ 571 nm	15		
	Nodeless	80 dB/km @ 532 nm	26	Beijing University of Technology	2017 <sup>[40]</sup>
Near infrared	Hypocycloid-core	150 dB/km @ 1200 nm	50	University of Bath	2010 <sup>[19]</sup>
	Kagome			University of Bath	2012 <sup>[25]</sup>
	Hypocycloid-core	40 dB/km @ 1500 nm	66		
	Kagome			University of Limoges	2013 <sup>[26]</sup>
	Hypocycloid-core	17 dB/km @ 1064 nm	30		
	Negative curvature	38 dB/km @ 1576 nm	46	University of Bath	2013 <sup>[32]</sup>



续表 1

Transmission band /nm	Different types of HCFs	Minimum loss and wavelength	Core diameter / $\mu\text{m}$	Research department	Time	
Near infrared	870-1120	Negative curvature	26 dB/km@1158 nm	32	University of Bath	2016 <sup>[58]</sup>
	850-1700	Nodeless	100 dB/km@1 $\mu\text{m}$	40	Beijing University of Technology	2016 <sup>[38]</sup>
	970-1230	Nodeless	30 dB/km@1090 nm	30	NKT Photonics	2016 <sup>[39]</sup>
	900-2050	Nodeless	25 dB/km@1200 nm	40	University of Southampton	2017 <sup>[42]</sup>
	625-930	Nodeless	7.7 dB/km@750 nm	41	University of Limoges	2017 <sup>[41]</sup>
	1302-1637	Conjoined-tube	2 dB/km@1512 nm	30	Beijing University of Technology	2018 <sup>[55]</sup>
	1300-1600	Nested-tube	1.3 dB/km@1450nm	31	University of Southampton	2018 <sup>[56]</sup>
Mid-infrared	2900-3850	Negative curvature	34 dB/km@3050 nm	93	University of Bath	2012 <sup>[31]</sup>
	2200-2890	Negative curvature	24 dB/km@2.4 $\mu\text{m}$	61	University of Bath	2013 <sup>[32]</sup>
	3400-4200	Negative curvature	76 dB/km@3635 nm	108	University of Bath	2013 <sup>[32]</sup>
	1200-4000	Nodeless	50 dB/km @2450 nm 130 dB/km @3 $\mu\text{m}$	70	Beijing University of Technology	2017 <sup>[48]</sup>
	2250-3400	Hypocycloid-core Kagome	9.6 dB/km @2462 nm	97	University of Southampton	2017 <sup>[29]</sup>

### 3 基于气体填充反谐振空芯光纤的新型拉曼激光光源研究进展

在非线性光学领域,受激拉曼散射是一种重要的激光频率变换技术,其波长范围可从紫外波段遍及到中红外波段,该技术可有效拓展现有的激光波段。与固体和液体拉曼增益介质相比,气体分子的受激拉曼散射具有增益系数高、拉曼频移大、增益介质可灵活选择等特点。基于传统拉曼气体池技术的拉曼光源受光波空间传输时衍射效应等因素的影响,抽运光在相互作用长度上难以保持高的功率密度,因此需要很高的阈值抽运功率,并且拉曼频率转换效率非常低。气体填充 HC-PCF 的出现为气体受激拉曼散射提供了一个近乎理想的相互作用环境,可以有效地将抽运光约束在  $\mu\text{m}$  量级的纤芯中,克服了光波传输过程中衍射效应的限制,同时提供非常长(m 量级)的相互作用长度,使得拉曼阈值抽运功率降低了 2~3 个数量级。另外,还可以通过合理设计 HC-PCF 的传输损耗谱来控制不同拉曼信号的有效增益,使得所需波长的高效率拉曼频率转换成为可能。

近年来,反谐振空芯光纤取得了突破性的进步: Kagome 空芯光纤中出现的内摆线纤芯结构有效地降低了反谐振空芯光纤的传输损耗,使其进入实用

化阶段;无节点反谐振空芯光纤的出现有效降低了反谐振空芯光纤的弯曲损耗,并扩展了光纤在紫外和中红外波段的激光传输。随着反谐振空芯光纤的快速发展,基于反谐振空芯光纤填充具有拉曼活性气体(如氢气、氮气、甲烷等)的非线性过程引起研究者们极大的兴趣,与光子带隙空芯光纤和实芯光子晶体光纤相比,反谐振空芯光纤具有更高的激光损伤阈值和更宽的导光通带(如紫外到中红外波段),因此利用气体填充反谐振空芯光纤技术,通过控制气体的非线性拉曼频率转换,可以高效地拓展传统激光器无法覆盖的波长。

2002 年 Benabid 等<sup>[22]</sup>报道了在填充氢气的 Kagome 反谐振空芯光纤中产生可见光波段的受激拉曼散射激光,其抽运激光波长为 532 nm、脉宽为 6 ns,斯托克斯光波长为 683 nm,产生的阈值仅为 800 nJ;反斯托克斯光波长为 435.2 nm,产生的阈值为 3.4  $\mu\text{J}$ 。这些拉曼激光产生的阈值比以往任何其他方法产生的阈值低了 2 个数量级。2007 年, Couny 等<sup>[2]</sup>利用峰值功率为 10 kW、波长为 1064 nm 的纳秒脉冲激光(脉宽为 12 ns)抽运充有氢气的 Kagome 反谐振空芯光纤,得到了波长范围为 325~2300 nm 的从紫外到中红外的跨越三个倍频程的拉曼光频梳,该光频梳包含了 45 阶的斯托克斯和反斯托克斯光谱线,如图 5 所示。

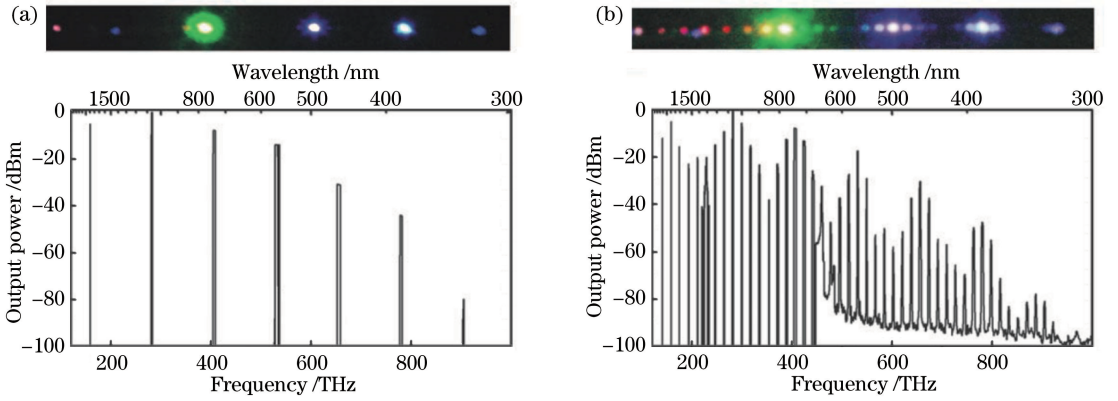


图 5 抽运充有氢气的长度为 1 m 的 Kagome 空芯光纤的高阶受激拉曼散射的照片(上)和光谱图(下)。 (a)线偏振光抽运;(b)圆偏振光抽运<sup>[2]</sup>

Fig. 5 Images (top) and spectra (below) of high-order stimulated Raman scattering through 1-m-long hydrogen-filled Kagome fiber. (a) Linearly polarized pump; (b) circularly polarized pump<sup>[2]</sup>

选择不同类型和不同导光通带的 HC-PCF, 可以有效地控制拉曼激光的光谱覆盖范围和光谱功率密度。2010 年, Wang 等<sup>[59]</sup> 利用一款结构紧凑、波长为 532 nm 的微片激光器(脉宽为 550 ps、平均功率为 25 mW)抽运充有 20 bar (1 bar=100 kPa) 氢气的 Kagome 反谐振空芯光纤, 产生了波长范围从紫外到可见光的 23 条拉曼谱线; 用同样的激光器抽运充有氢气的光子带隙空芯光纤, 在可见光波段产生了 7 条光谱功率密度更高的拉曼激光。

直接抽运空芯光纤中的拉曼活性气体, 产生的拉曼激光的相位是随机变化的。2012 年, Abdolvand 等<sup>[60]</sup> 制备了一种相位稳定的拉曼光频梳。首先将中心波长为 1064 nm 的微片激光器输出的能量为 100  $\mu$ J、脉宽为 2 ns 激光分成两束, 一束耦合进长度为 2 m 的充有氢气的光子带隙空芯光纤, 产生了波长为 1135 nm 的拉曼激光。将剥离抽运光后的拉曼激光作为信号光, 与另外一束抽运光一起耦合进长度为 60 cm 的 Kagome 反谐振空芯光纤, 这里可以将其看作拉曼功率放大器。利用一对反射镜控制抽运光的延迟时间, 在空芯光纤内部, 能量为 90  $\mu$ J 的抽运光对拉曼信号进行放大, 在光纤输出端得到了相位稳定的拉曼光频梳。该过程类似于激光放大器的放大过程, 且在此产生拉曼信号光的抽运光和拉曼放大器的抽运光均来自于同一束激光光源。图 6(a) 给出了装置示意图, 其中  $\omega_p$  和  $\omega_s$  分别为抽运激光和拉曼激光的频率, M 为反射镜, BS 为光束分束器, DM 为二向色镜。图 6(b) 为拉曼光频梳的光谱图和失配图, 其中  $as_4$ 、 $as_3$ 、 $as_2$ 、 $as_1$  分别为第 4, 3, 2, 1 阶反斯托克斯拉曼光, p 为抽

运激光,  $s_1$ 、 $s_2$ 、 $s_3$ 、 $s_4$  和  $s_5$  分别为第 1, 2, 3, 4, 5 阶斯托克斯拉曼光。

最近几年, 反谐振空芯光纤取得了突破性进展, 通过去除反谐振空芯光纤包层的节点, 可以有效地降低 HC-ARF 的弯曲损耗; 通过减小光纤包层石英玻璃管的壁厚, 可以拓宽光纤的传输带宽, 实现跨倍频程的传输通带, 为非线性频率转换提供了更为广阔的应用空间, 例如可以产生转换效率更高、波长更丰富的拉曼激光。2017 年, Gao 等<sup>[61]</sup> 分别利用线偏振和圆偏振的绿光皮秒激光抽运可见光-近红外跨倍频程传输的无节点反谐振空芯光纤中的空气, 在 1 atm (1 atm = 101.325 kPa) 下空气中产生氮气的振动和转动拉曼激光。第一个实验装置包括一台商用的激光系统, 其出射的线偏振激光的脉宽为 20 ps, 中心波长为 532 nm, 最大单脉冲能量为 350  $\mu$ J, 重复频率为 1 kHz, 空芯光纤的长度为 1.5 m。在 140  $\mu$ J 的入射脉冲能量和 100  $\mu$ J 的出射脉冲能量下, 使用 Horiba 单色仪测得了丰富的空气拉曼激光谱线, 如图 7(a) 所示。这些拉曼谱线包含空气中氮气分子(拉曼频移  $\Delta\nu = 2331 \text{ cm}^{-1}$ ) 的斯托克斯振动拉曼峰( $s_1$ , 607 nm 和  $s_2$ , 708 nm) 和反斯托克斯振动拉曼峰( $as_1$ , 473 nm 和  $as_2$ , 426 nm), 氧气分子( $\Delta\nu = 1556 \text{ cm}^{-1}$ ) 的斯托克斯振动拉曼峰( $s_1$ , 508 nm) 和反斯托克斯振动拉曼峰( $as_1$ , 491 nm), 二氧化碳分子( $\Delta\nu = 1286 \text{ cm}^{-1}$ ) 的斯托克斯振动拉曼峰( $s_1$ , 571 nm) 和反斯托克斯振动拉曼峰( $as_1$ , 498 nm), 水分子( $\Delta\nu = 3506 \text{ cm}^{-1}$ ) 的斯托克斯振动拉曼峰( $s_1$ , 653 nm)。第二个转动拉曼激光产生实验采用了相同的实验装置, 不同的是将

激光耦合进空芯光纤之前使其变成圆偏振光,并采用长度为 10 m 的空芯光纤。在 140  $\mu\text{J}$  的入射单脉冲能量下,除获得氮气分子的振动拉曼谱线外,还获得了其丰富的转动拉曼谱线。图 7(b)显示了氮气分子的第 1 阶斯托克斯振动拉曼谱线( $s_1$ , 607 nm)、抽运光(532 nm)和第 1 阶反斯托克斯振动拉曼谱线( $as_1$ , 473 nm)产生的转动拉曼谱线。图中含有超

过 20 条密集分布的转动拉曼谱线,这些转动拉曼谱线具有相同的、约为  $60\text{ cm}^{-1}$  的拉曼频移间隔[图 7(b)中插图],对应于氮气分子的  $s$  ( $J=6$ ) 支谱( $J$  为初态转动量子数),经过计算得到拉曼频移为  $59.94\text{ cm}^{-1}$ 。这样一个结构简单紧凑的多谱线拉曼激光源在可见光波段具有较高的光谱功率密度,有望在生物成像领域发挥重要的作用。

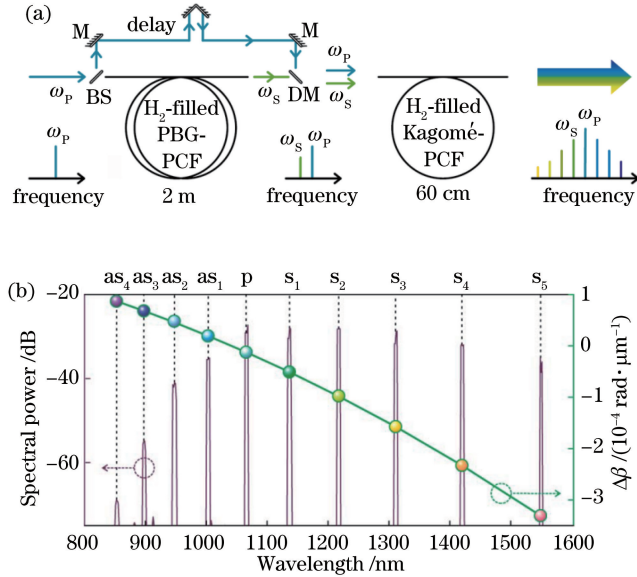


图 6 相位稳定的拉曼光谱梳。(a) 装置示意图;(b) 拉曼光频梳的光谱图和失配图<sup>[60]</sup>

Fig. 6 Raman frequency comb with stable phase. (a) Schematic of setup; (b) spectrum of Raman frequency comb and total wavevector mismatch  $\Delta\beta$ <sup>[60]</sup>

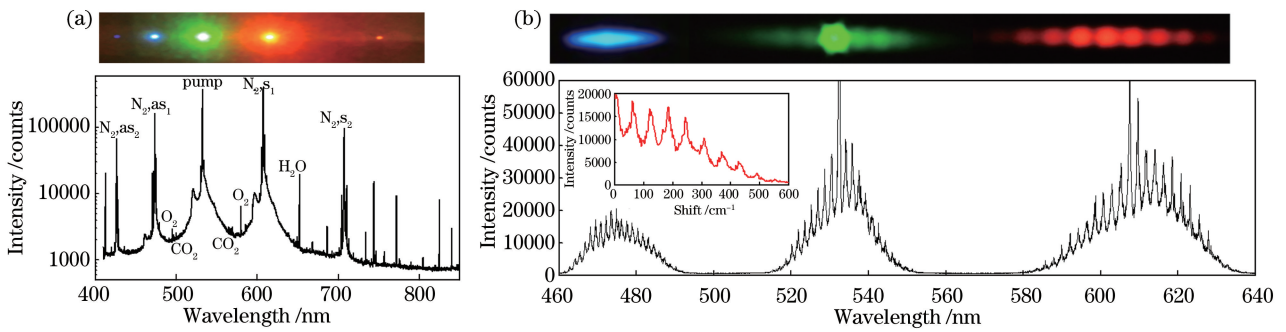


图 7 空气拉曼光谱图。(a) 以对数坐标标识的空气振动拉曼光谱,上方的图像是利用棱镜分光之后拍摄的振动拉曼谱线;(b) 以线性坐标标识的空气中氮气的转动拉曼光谱,上方的图像是利用棱镜分光之后拍摄的转动拉曼谱线,插图是 473 nm 短波方向的转动拉曼光谱<sup>[61]</sup>

Fig. 7 Raman spectra of air. (a) Vibrational Raman spectrum of ambient air plotted in log scale with upper photo showing vibrational Raman lines at output of fiber using prism; (b) rotational Raman spectrum of nitrogen molecules in ambient air plotted in linear scale with upper photo showing rotational Raman lines at output of fiber using prism and insert being rotational Raman spectrum on blue side of 473 nm<sup>[61]</sup>

### 3.1 气体拉曼激光紫外波长扩展

紫外激光具有波长短、分辨率高和光子能量大等特点,广泛应用于半导体工业、离子操纵捕获、精密光谱、光学时钟和量子信息处理等领域。非线性

光学频率转换技术在紫外波长激光产生中起到了非常关键的作用,其中,利用非线性晶体直接对近红外激光进行相位匹配倍频(如  $1\text{ }\mu\text{m}$ 、800 nm)是产生紫外激光的常用技术,利用光学参量振荡器(OPO)



和光学参量放大器(OPA)可以产生波长可调谐的可见光激光,结合二倍频、三倍频和四倍频技术可以产生 200~400 nm 的紫外激光。少数非线性光学晶体(如 KBBF)可以产生波长短至 176 nm 的真空紫外激光,但这通常依赖于非线性光学晶体,对于更短波长紫外激光的产生没有相关报道。一般地,熔融石英在可见光和近红外波段具有很高的透过率,且其机械强度高、化学稳定性好、生物相容性良好,因此广泛用作光纤材料。但在深紫外波段,石英光纤表现出高材料吸收损耗、强瑞利散射以及光暗化等缺点,使其无法在这一波段中工作。与固体材料相反,很多气体在真空紫外甚至更短波长具有很好的透射谱,选择合适的气体填充空芯光纤,并结合非线性效应(如受激拉曼散射、超连续产生、色散波产生和高次谐波产生),成为深紫外波长激光产生的一种新思路,并已成为近年来的研究热点。下面简要

介绍几项利用拉曼活性气体填充 HC-PCF 技术向紫外波长扩展的重要工作。

2015 年,Tani 等<sup>[62]</sup>报道了波长从紫外到中红外的跨越三个倍频程的瞬态拉曼光频梳。利用波长为 800 nm、脉冲能量为 26 μJ、脉宽为 300 fs 的钛宝石激光器抽运充有氢气的反谐振空芯光纤,使用的空芯光纤的长度为 30 cm,产生的拉曼光频梳波长范围为 180~2400 nm。同年,该研究小组采用中心波长为 805 nm、脉宽为 30 fs、单脉冲能量为 2.5 μJ 的钛宝石激光器作为抽运源,抽运充有 5 bar 氢气的 Kagome 反谐振空芯光纤,产生了跨越三个倍频程的真空紫外超连续光谱<sup>[63]</sup>,其光谱覆盖范围为 124~1200 nm(图 8)。通过进一步模拟仿真和对比有无线拉曼项情况下的光谱展宽情况,可以发现拉曼辅助增强的克尔非线性效应可将超连续光谱的覆盖范围显著地向可见光和紫外波段扩展。

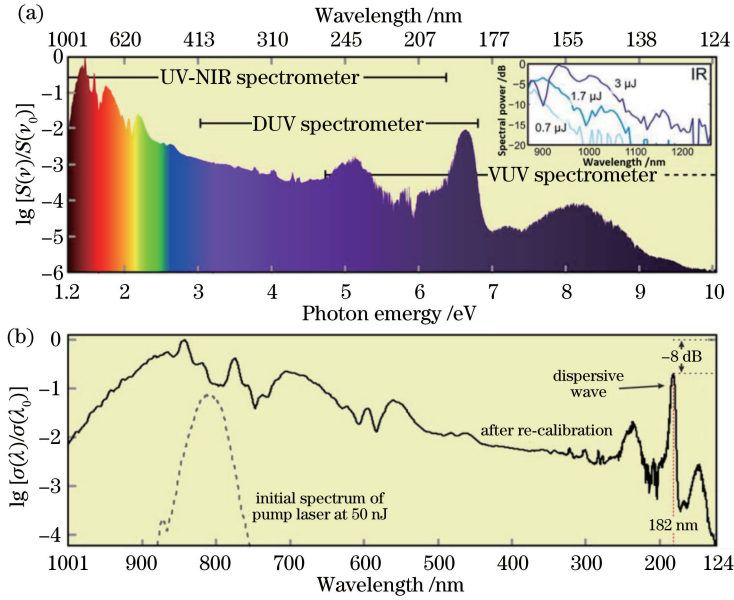


图 8 超连续光谱。(a)利用三个光谱仪记录的超连续光谱,插图为在近红外波段中随着入射脉冲能量增加的超连续光谱;  
(b)重新校准的超连续光谱<sup>[63]</sup>

Fig. 8 Supercontinuum spectra. (a) Supercontinuum spectra obtained using three different spectrometers, and inset is supercontinuum spectra in near infrared for different pulse energies; (b) supercontinuum spectrum after re-calibration <sup>[63]</sup>

2016 年,该研究小组利用脉宽为 3 ns、单脉冲能量为 10 μJ、中心波长为 266 nm 的紫外纳秒激光器,抽运充有 25 bar 氢气的 Kagome 反谐振空芯光纤,产生了波长覆盖范围从真空紫外到可见光波段的拉曼光频梳<sup>[64]</sup>和 8 条氢气分子的斯托克斯和反斯托克斯振动拉曼谱线(图 9),其波长范围覆盖真空紫外 184 nm 到可见光 478 nm。

### 3.2 气体拉曼激光中红外波长扩展

中红外 2~5 μm 波段激光在军事光电对抗、大

气环境监测、雷达、遥感以及光谱研究等诸多领域中具有重要的应用价值。同时,中红外波段是很多气体分子的指纹区,这是因为很多气体分子的基本振动、转动吸收光谱带正好位于这个区域,所以在中红外波段中不同气体分子的吸收峰具有强烈的特征性(图 10)。由于每一种分子键都有不同的振动频率,不同分子中相同类型的分子键所在的结构环境也存在一定的差异,所以任意两种不同的分子均不具有完全相同的红外吸收光谱,即只要分子结构上有微

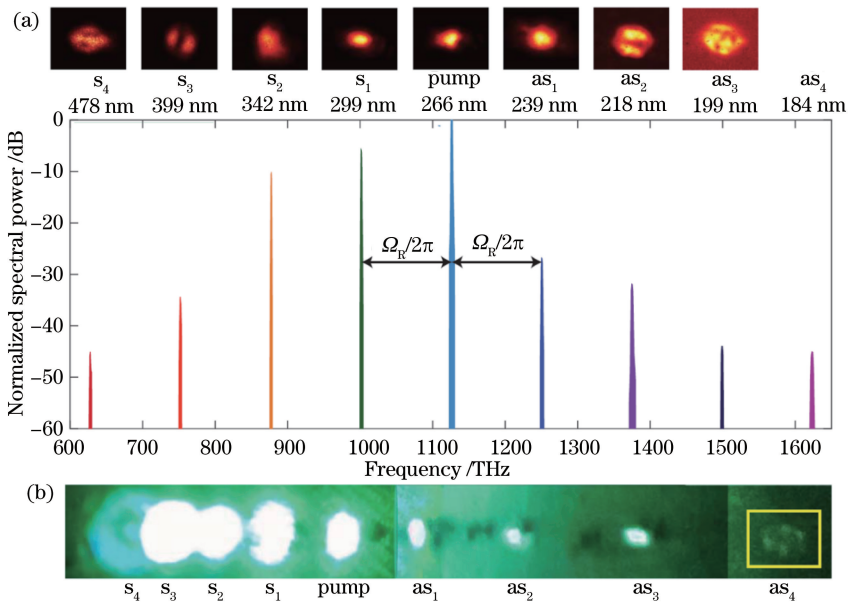


图 9 从真空紫外到可见光波段的拉曼光频梳。(a)拉曼光频梳的光谱图,上方为光纤端面出射的近场模式图( $as_4$  太弱不能直接成像);(b)输出光谱经过氟化钙( $CaF_2$ )棱镜分光投射在荧光屏上的照片,框内的  $as_4$  信号表现出一个复杂的远场轮廓<sup>[64]</sup>

Fig. 9 UV-Visible Raman optical frequency comb. (a) Measured spectrum of Raman optical frequency comb with near-field optical images of modal patterns at fiber end face shown above ( $as_4$  is too weak to be directly imaged); (b) photograph of output spectrum dispersed at  $CaF_2$  prism and cast onto fluorescent screen, with  $as_4$  signal highlighted by box exhibiting complex far-field profile<sup>[64]</sup>

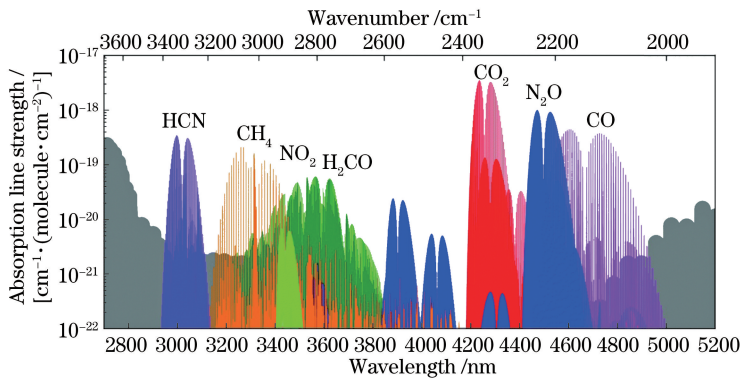


图 10 在中红外波段中不同气体分子的吸收谱线

Fig. 10 Absorption lines of different gas molecules in mid-infrared

小变化,都会引起中红外光谱的明显改变。因此中红外激光还在痕量气体监测、公共安全、国家安全、环境和医学科学等领域有着重大应用需求。

与固体拉曼介质相比,气体拉曼介质具有拉曼频移大和损伤阈值高的优点,有利于产生高功率的激光。通过选择合适的抽运激光波长、拉曼活性气体以及合理设计的中红外传输的空芯光纤,可以实现高功率的中红外拉曼激光输出,该技术已经被证明是一种产生中红外激光的有效手段。其中,国防科技大学王泽锋研究小组在近红外和中红外气体拉曼激光产生方面做了大量研究工作<sup>[65-69]</sup>。例如,2014 年该小

组实现了单程高增益的波长为  $1.9 \mu m$  的光纤气体激光器。该激光器利用一个线偏振的、波长为  $1064 \text{ nm}$  的亚纳秒脉冲微片激光器抽运一段充有高压氢气的负曲率反谐振空芯光纤,实现了氢气分子一级振动斯托克斯波长为  $1907 \text{ nm}$  的高效转换<sup>[68]</sup>。其微片激光器输出激光的光谱宽度约为  $0.3 \text{ nm}$ ,脉宽约为  $0.7 \text{ ns}$ ,重复频率为  $7.25 \text{ kHz}$ ,平均输出功率为  $65 \text{ mW}$ 。实验中将不同气压的氢气充入长度为  $6.5 \text{ m}$  的负曲率反谐振空芯光纤中,其纤芯直径为  $53 \mu m$ ,光纤在波长为  $1064 \text{ nm}$  和  $1907 \text{ nm}$  处的传输损耗分别为  $120 \text{ dB/km}$  和  $350 \text{ dB/km}$ 。当氢气压强

为 2.3 MPa 时,可实现从抽运光到拉曼激光 1907 nm 大于 27% 的最大能量转换效率,对应的量子转换效率大于 48%,拉曼激光的平均功率约为 10 mW,峰值功率大于 2 kW。2017 年该组又实现了氢气在波长为 1.9  $\mu\text{m}$  处具有更高峰值功率的拉曼激光输出,其抽运激光波长为 1064 nm,脉宽为 0.5 ns,重复频率为 1 kHz,光谱线宽为 6 pm,平均功率大于 240 mW,用该激光抽运充有 3 bar 氢气、长度为 1.4 m 的负曲率反谐振空芯光纤,产生的拉曼激光平均功率为 55 mW,单脉冲能量为 55  $\mu\text{J}$ ,线宽为 2 GHz,脉宽为 370 ps,对应的峰值功率达到

150 kW,量子转换效率为 54%<sup>[69]</sup>。

2017 年, Gladyshev 等<sup>[70]</sup> 基于充有高压氢气的无节点反谐振空芯光纤实现了波长为 4.4  $\mu\text{m}$  的中红外氢气拉曼激光输出(图 11)。选择中心波长为 1.56  $\mu\text{m}$ 、脉宽为 2 ns、峰值功率为 6.5 kW 的掺铒光纤激光器作为抽运源,抽运充有 30 atm (1 atm = 101.325 kPa) 氢气的无节点反谐振空芯光纤,得到了平均功率为 30 mW、峰值功率为 0.6 kW、波长为 4.4  $\mu\text{m}$  的中红外拉曼激光输出,对应最大的量子转换效率为 15%,已成为在中红外波段中传输的无节点反谐振空芯光纤的突破性进展。

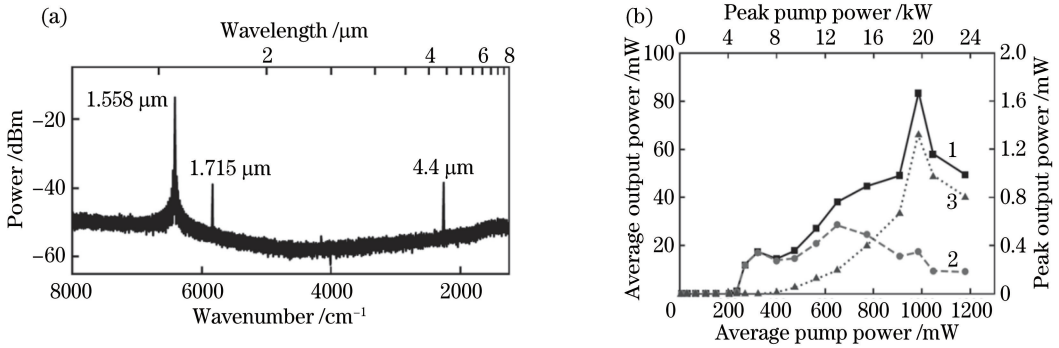


图 11 波长为 4.4  $\mu\text{m}$  的中红外氢气拉曼激光输出。(a) 输出光谱; (b) 输出激光平均(峰值)功率与入射光平均(峰值)功率的关系, 曲线 1, 2, 3 分别为光纤输出全部拉曼激光、波长为 1.906  $\mu\text{m}$  和 4.4  $\mu\text{m}$  拉曼激光的平均(峰值)功率<sup>[70]</sup>

Fig. 11  $\text{H}_2$  Raman laser output of 4.4  $\mu\text{m}$  in mid-infrared. (a) Output spectrum; (b) average (peak) output power versus average launched (peak) pump power, with curves 1, 2, and 3 being average (peak) powers of all Raman lasers, 1.906  $\mu\text{m}$  Raman laser, and 4.4  $\mu\text{m}$  Raman laser, respectively<sup>[70]</sup>

2018 年,北京工业大学研究小组基于高性能近红外、中红外宽光谱导光的无节点反谐振空芯光纤实现了高功率的波长为 2.812  $\mu\text{m}$  的中红外拉曼激光输出(图 12)<sup>[44]</sup>。利用中心波长为 1064 nm、脉宽为 12 ps、单脉冲能量为 766  $\mu\text{J}$  的固体激光器作为抽运源,通过半波片、偏振分束器(PBS)和 1/4 波片调整激光的功率,随后抽运充有 1.8 MPa 的甲烷气体分子的无节点反谐振空芯光纤,产生的波长为 2.8  $\mu\text{m}$  中红外拉曼激光的平均功率为 113 mW,量子效率高达 40%,单脉冲能量为 113  $\mu\text{J}$ ,对应的峰值功率为 9.5 MW。该结果为目前基于气体光纤拉曼激光技术在中红外波段获得的最高峰值功率拉曼激光输出,并且进一步证明了通过利用近红外波段的更高能量的激光器抽运充有甲烷气体的空芯光纤,有望获得更高功率的中红外拉曼激光输出。同年, Li 等<sup>[71]</sup> 报道了一种新型高效的波长为 2.8  $\mu\text{m}$  的中红外级联拉曼激光源。级联拉曼激光源包含两

套甲烷填充的空芯光纤装置,第一套装置利用中心波长为 1064.6 nm、线宽为 6 pm、脉宽为 0.4 ns、重复频率为 1 kHz、平均功率为 160 mW 的商用微片激光器作为抽运源,直接抽运长度为 2 m 的充有 2 bar 甲烷气体分子的负曲率反谐振空芯光纤,得到中心波长为 1543.9 nm、最大平均功率为 51.2 mW 的第 1 阶斯托克斯拉曼激光输出,对应的拉曼转换效率为 61%,量子效率为 87%。进一步地,利用该拉曼激光作为第二套装置的抽运源,抽运长度为 2.2 m 的充有气压 11 bar 甲烷气体分子的无节点反谐振空芯光纤,实现了最大平均功率为 13.8 mW 的、波长为 2.8  $\mu\text{m}$  的中红外激光输出,对应的拉曼转换效率为 41%,量子效率为 75%。通过这种两级分步的抽运装置,实现了从抽运光波长 1064.6 nm 到斯托克斯光波长 2808.9 nm 的高效拉曼激光转换,其中量子转换效率高达 65%。该级联抽运为高效中红外拉曼激光变换提供了一种新的思路。



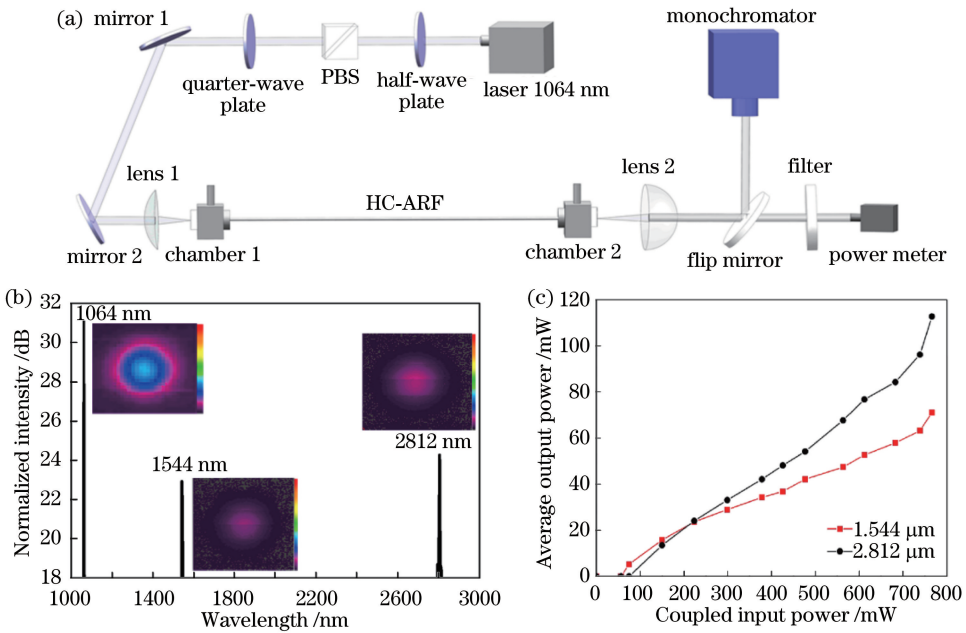


图 12 高峰值功率的波长为  $2.812 \mu\text{m}$  的中红外拉曼激光输出。(a) 中红外气体拉曼激光装置；(b) 在甲烷气体压强为  $1.5 \text{ MPa}$ 、抽运功率为  $381 \text{ mW}$  下得到的拉曼光谱，插图分别为  $1.064$ ， $1.544$ ， $2.812 \mu\text{m}$  波长处的近场模式图；(c) 输出拉曼功率与耦合抽运功率之间的关系<sup>[44]</sup>

Fig. 12 High peak power  $2.812 \mu\text{m}$  mid-infrared Raman laser. (a) Setup of mid-infrared gas Raman laser; (b) Raman spectrum at pump power of  $381 \text{ mW}$  and  $\text{CH}_4$  pressure of  $1.5 \text{ MPa}$ , inset: near-field mode profiles at  $1.064 \mu\text{m}$ ,  $1.544 \mu\text{m}$ , and  $2.812 \mu\text{m}$ , respectively; (c) output Raman power versus coupled pump power<sup>[44]</sup>

## 4 总结与展望

自 1999 年第一根 HC-PCF 问世以来, HC-PCF 取得了飞速发展, 已成为非线性光学、超快光学、高功率激光、生物光子学和量子光学等一系列跨学科的多功能实验应用平台。但是, HC-PCF 在实际应用中仍存在很多问题, 这限制了其更广泛的应用。例如, HC-PCF 在光通信领域的未来不明朗, 这主要是因为与传统实芯石英光纤相比, HC-PCF 的传输损耗仍然较高, 传输通带较窄, 且 HC-PCF 的结构较为复杂, 对制备工艺的参数控制要求非常苛刻, 并且控制粗细均匀、长度为十几千米甚至千米量级的光纤仍具有非常大的挑战性。反谐振空芯光纤空气中传输的基模光场仅有约  $0.01\%$  的光强与纤芯周围的石英壁重叠(光子带隙空芯光纤中约为  $0.2\%$ ), 具有更低的表面散射损耗, 表现出更高的激光损伤阈值。然而, 在超短脉冲激光传输的实际应用中, 要求经过光纤传输后激光的偏振态不发生改变, 但目前还没有保偏反谐振空芯光纤控制的相关报道。

高性能反谐振空芯光纤的出现为非线性光学提供了一个近乎理想的相互作用环境, 可以有效地将抽运激光约束在  $\mu\text{m}$  量级的纤芯中, 克服了光波在

传输过程中衍射效应的限制, 同时高性能的反谐振空芯光纤还提供了  $\text{m}$  量级的相互作用长度, 大大增强了光与物质的相互作用效果。基于气体填充 HC-ARF 的非线性拉曼激光频率变换技术, 可以有效地拓展激光波长范围, 特别是在紫外和中红外波段。与固体介质相反, 很多气体介质在这些波段中具有很好的透射谱, 拉曼活性气体具有频移大和损伤阈值高的优点。介绍了基于反谐振空芯光纤填充不同气体的拉曼激光在紫外和中红外波段的拓展情况, 在深紫外波段覆盖到的最短波长为  $124 \text{ nm}$ , 在中红外波段产生了最长波长为  $4.4 \mu\text{m}$  的中红外拉曼激光。因此, 基于气体填充 HC-ARF 技术探索拉曼激光产生波长极限和功率更高的紫外或中红外拉曼激光是未来的重要发展与研究方向, 这通常强烈地依赖于高性能、宽带宽、低损耗的紫外或中红外传输的反谐振空芯光纤。从已报道的气体拉曼激光实验可以看出, 目前基于 HC-ARF 的拉曼气体池大多将光纤放置于金属气体腔中进行密封充气, 并采用复杂的空间光路耦合, 大大降低了系统的稳定性, 然而这种方法不能实现全光纤化气体池, 这是因为反谐振空芯光纤与实芯石英光纤的熔接损耗较大。因此研制全光纤化的 HC-ARF 拉曼气体池、降低反谐

振空芯光纤与常用实芯光纤的熔接损耗也是一个十分重要的、可满足未来更广泛应用需求的研究课题。

总之,未来反谐振空芯光纤的研究应侧重于优化光纤的结构设计和改进光纤的制备工艺,进一步降低 HC-ARF 的传输损耗,研制能满足实际应用需求的保偏反谐振空芯光纤以及低损耗、宽通带紫外或中红外传输的反谐振空芯光纤等。

## 5 结束语

通过在 HC-PCF 包层构建微结构,可以摆脱纤芯固体介质材料的束缚,从而实现空气导光,为光波传输提供一个低非线性、低色散、低损耗、低延迟的理想环境。与光子带隙空芯光纤相比,反谐振空芯光纤因具有宽传输通带、低传输损耗、高激光损伤阈值和高模式纯度等独特性质,已成为近年来的研究热点,有望为高功率脉冲激光传输、超快非线性光学、短距离高速大容量光通信、生物化学分析以及量子存储等前沿应用领域提供一个高效、高灵敏度的理想平台。简要回顾了 HC-PCF 的发展历程,列举了一些具有国际影响力的研究者和科研团队在反谐振空芯光纤研制方面取得的突破性成果,重点介绍了最近几年出现的最具代表性的几种新型反谐振空芯光纤,并详细讨论了反谐振空芯光纤在非线性光学领域中的重要应用,主要包括新型拉曼激光在紫外和中红外波长方向扩展的技术背景、研究现状以及前景展望。

## 参 考 文 献

- [1] Cregan R F, Mangan B J, Knight J C, *et al.* Single-mode photonic band gap guidance of light in air[J]. *Science* (New York, n. y.), 1999, 285(5433): 1537-1539.
- [2] Couny F, Benabid F, Roberts P J, *et al.* Generation and photonic guidance of multi-octave optical-frequency combs [J]. *Science*, 2007, 318 (5853): 1118-1121.
- [3] Ghosh S, Bhagwat A R, Renshaw C K, *et al.* Low-light-level optical interactions with rubidium vapor in a photonic band-gap fiber [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(2): 023603.
- [4] Okaba S, Takano T, Benabid F, *et al.* Lamb-Dicke spectroscopy of atoms in a hollow-core photonic crystal fibre[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 4096.
- [5] Sprague M R, Michelberger P S, Champion T F M, *et al.* Broadband single-photon-level memory in a

- hollow-core photonic crystal fibre [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(4): 287-291.
- [6] Emaury F, Dutin C F, Saraceno C J, *et al.* Beam delivery and pulse compression to sub-50 fs of a modelocked thin-disk laser in a gas-filled Kagome-type HC-PCF fiber [J]. *Optics Express*, 2013, 21 (4): 4986.
- [7] Joly N Y, Nold J, Chang W, *et al.* Bright spatially coherent wavelength-tunable deep-UV laser source using an ar-filled photonic crystal fiber[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(20): 203901.
- [8] Cubillas A M, Unterkofler S, Euser T G, *et al.* Photonic crystal fibres for chemical sensing and photochemistry [J]. *Chemical Society Reviews*, 2013, 42(22): 8629-8648.
- [9] Dinish U S, Fu C Y, Soh K S, *et al.* Highly sensitive SERS detection of cancer proteins in low sample volume using hollow core photonic crystal fiber[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2012, 33 (1): 293-298.
- [10] Mangan B J, Farr L, Langford A, *et al.* Low loss (1.7 dB/km) hollow core photonic bandgap fiber [C]. *Optical Fiber Communication*, 2004: PDP24.
- [11] Roberts P J, Couny F, Sabert H, *et al.* Ultimate low loss of hollow-core photonic crystal fibres [J]. *Optics Express*, 2005, 13(1): 236-244.
- [12] Peng X, Mielke M, Booth T. High average power, high energy 1.55  $\mu\text{m}$  ultra-short pulse laser beam delivery using large mode area hollow core photonic band-gap fiber [J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 923-932.
- [13] Hollow core photonic bandgap fiber[EB/OL]. [2019-01-19]. <https://www.nktpotonics.com/wp-content/uploads/sites/3/2015/01/HC-440.pdf?1538728909>
- [14] Amezcua-Correa R, Gèrôme F, Leon-Saval S G, *et al.* Control of surface modes in low loss hollow-core photonic bandgap fibers [J]. *Optics Express*, 2008, 16(2): 1142-1149.
- [15] Poletti F, Wheeler N V, Petrovich M N, *et al.* Towards high-capacity fibre-optic communications at the speed of light in vacuum [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(4): 279-284.
- [16] Duguay M A, Kokubun Y, Koch T L, *et al.* Antiresonant reflecting optical waveguides in SiO<sub>2</sub>-Si multilayer structures [J]. *Applied Physics Letters*, 1986, 49(1): 13-15.
- [17] Litchinitser N M, Abeeluck A K, Headley C, *et al.* Antiresonant reflecting photonic crystal optical waveguides [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(18): 1592-1594.

- [18] Ding W, Wang Y Y. Analytic model for light guidance in single-wall hollow-core anti-resonant fibers[J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 27242-27256.
- [19] Wang Y Y, Couny F, Roberts P J, *et al.* Low loss broadband transmission in optimized core-shape Kagome hollow-core PCF[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2010: CPDB4.
- [20] Ding W, Wang Y Y. Hybrid transmission bands and large birefringence in hollow-core anti-resonant fibers [J]. *Optics Express*, 2015, 23(16): 21165-21174.
- [21] Uebel P, Günendi M, Frosz M H, *et al.* A broadband robustly single-mode hollow-core PCF by resonant filtering of higher order modes [C]. *Frontiers in Optics 2015: FW6C.2*.
- [22] Benabid F, Knight J C, Antonopoulos G, *et al.* Stimulated raman scattering in hydrogen-filled hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Science*, 2002, 298(5592): 399-402.
- [23] Pearce G J, Wiederhecker G S, Poulton C G, *et al.* Models for guidance in Kagome-structured hollow-core photonic crystal fibres [J]. *Optics Express*, 2007, 15(20): 12680-12685.
- [24] Wang Y Y, Wheeler N V, Couny F, *et al.* Low loss broadband transmission in hypocycloid-core Kagome hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(5): 669-671.
- [25] Wang Y Y, Peng X, Alharbi M, *et al.* Design and fabrication of hollow-core photonic crystal fibers for high-power ultrashort pulse transportation and pulse compression [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(15): 3111-3113.
- [26] Debord B, Alharbi M, Bradley T, *et al.* Hypocycloid-shaped hollow-core photonic crystal fiber Part I: arc curvature effect on confinement loss [J]. *Optics Express*, 2013, 21(23): 28597-28608.
- [27] Bradley T D, Wang Y Y, Alharbi M, *et al.* Optical properties of low loss (70 db/km) hypocycloid-core kagome hollow core photonic crystal fiber for Rb and Cs based optical applications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(16): 2752-2755.
- [28] Debord B, Alharbi M, Benoit A, *et al.* Ultra low-loss hypocycloid-core Kagome hollow-core photonic crystal fiber for green spectral-range applications[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(21): 6245-6248.
- [29] Wheeler N V, Bradley T D, Hayes J R, *et al.* Low-loss Kagome hollow-core fibers operating from the near- to the mid-IR [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(13): 2571-2574.
- [30] Pryamikov A D, Biriukov A S, Kosolapov A F, *et al.* Demonstration of a waveguide regime for a silica hollow-core microstructured optical fiber with a negative curvature of the core boundary in the spectral region  $>35 \mu\text{m}$  [J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 1441-1448.
- [31] Yu F, Wadsworth W J, Knight J C. Low loss silica hollow core fibers for 3-4  $\mu\text{m}$  spectral region [J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 11153-11158.
- [32] Yu F, Knight J C. Spectral attenuation limits of silica hollow core negative curvature fiber [J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 21466-21471.
- [33] Jaworski P, Yu F, Carter R M, *et al.* High energy green nanosecond and picosecond pulse delivery through a negative curvature fiber for precision micro-machining[J]. *Optics Express*, 2015, 23(7): 8498-8506.
- [34] Vincetti L, Setti V. Extra loss due to Fano resonances in inhibited coupling fibers based on a lattice of tubes[J]. *Optics Express*, 2012, 20(13): 14350-14361.
- [35] Kolyadin A N, Kosolapov A F, Pryamikov A D, *et al.* Light transmission in negative curvature hollow core fiber in extremely high material loss region[J]. *Optics Express*, 2013, 21(8): 9514-9519.
- [36] Belardi W, Knight J C. Hollow antiresonant fibers with low bending loss[J]. *Optics Express*, 2014, 22(8): 10091-10096.
- [37] Belardi W. Design and properties of hollow antiresonant fibers for the visible and near infrared spectral range[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(21): 4497-4503.
- [38] Gao S F, Wang Y Y, Liu X L, *et al.* Bending loss characterization in nodeless hollow-core anti-resonant fiber [J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 14801-14811.
- [39] Michieletto M, Lyngsø J K, Jakobsen C, *et al.* Hollow-core fibers for high power pulse delivery[J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7103-7119.
- [40] Gao S F, Wang Y Y, Liu X L, *et al.* Nodeless hollow-core fiber for the visible spectral range [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(1): 61-64.
- [41] Debord B, Amsanpally A, Chafer M, *et al.* Ultralow transmission loss in inhibited-coupling guiding hollow fibers[J]. *Optica*, 2017, 4(2): 209-217.
- [42] Hayes J R, Sandoghchi S R, Bradley T D, *et al.* Antiresonant hollow core fiber with an octave spanning bandwidth for short haul data communications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(3): 437-442.
- [43] Gao S F, Wang Y Y, Wang P. Silica-based modeless hollow-core fiber for broadband mid-IR guidance[C] // *Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific*



- Rim (CLEO-PR), 31 July-4 Aug. 2017, Singapore, Singapore, 2017: 1-2.
- [44] Cao L, Gao S F, Peng Z G, *et al.* High peak power 2.8  $\mu\text{m}$  Raman laser in a methane-filled negative-curvature fiber[J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 5609-5615.
- [45] Février S, Gérôme F, Labruière A, *et al.* Ultraviolet guiding hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(19): 2888-2890.
- [46] Hartung A, Kobelke J, Schwuchow A, *et al.* Double antiresonant hollow core fiber - guidance in the deep ultraviolet by modified tunneling leaky modes [J]. *Optics Express*, 2014, 22(16): 19131-19140.
- [47] Hartung A, Kobelke J, Schwuchow A, *et al.* Low-loss single-mode guidance in large-core antiresonant hollow-core fibers [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(14): 3432-3435.
- [48] Gebert F, Frosz M H, Weiss T, *et al.* Damage-free single-mode transmission of deep-UV light in hollow-core PCF[J]. *Optics Express*, 2014, 22(13): 15388-15396.
- [49] Gao S F, Wang Y Y, Ding W, *et al.* Hollow-core negative-curvature fiber for UV guidance[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(6): 1347-1350.
- [50] Yu F, Cann M, Brunton A, *et al.* Single-mode solarization-free hollow-core fiber for ultraviolet pulse delivery[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10879-10887.
- [51] Poletti F. Nested antiresonant nodeless hollow core fiber [J]. *Optics Express*, 2014, 22(20): 23807-23828.
- [52] Hasan M I, Akhmediev N, Chang W. Positive and negative curvatures nested in an antiresonant hollow-core fiber[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(4): 703-706.
- [53] Chaudhuri S, van Putten L D, Poletti F, *et al.* Low loss transmission in negative curvature optical fibers with elliptical capillary tubes [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(18): 4228-4231.
- [54] Habib M S, Bang O, Bache M. Low-loss hollow-core silica fibers with adjacent nested anti-resonant tubes [J]. *Optics Express*, 2015, 23(13): 17394-17406.
- [55] Gao S F, Wang Y Y, Ding W, *et al.* Hollow-core conjoined-tube negative-curvature fibre with ultralow loss[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 2828.
- [56] Bradley T D, Hayes J R, Chen Y, *et al.* Record low-loss 1.3db/km data transmitting antiresonant hollow core fibre[C]//2018 European Conference on Optical Communication (ECOC), 23-27 Sept. 2018, Rome, Italy, 2018: 1-3.
- [57] Pryamikov D, Kosolapov F, Alagashev K, *et al.* Hollow-core microstructured 'revolver' fibre for the UV spectral range[J]. *Quantum Electronics*, 2016, 46(12): 1129-1133.
- [58] Yu F, Knight J C. Negative curvature hollow-core optical fiber[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016, 22(2): 146-155.
- [59] Wang Y Y, Couny F, Light P S, *et al.* Compact and portable multiline UV and visible Raman lasers in hydrogen-filled HC-PCF [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(8): 1127-1129.
- [60] Abdolvand A, Walser A M, Ziemenczuk M, *et al.* Generation of a phase-locked Raman frequency comb in gas-filled hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(21): 4362-4364.
- [61] Gao S F, Wang Y Y, Wang P, Visible Raman generation from ambient air in a nodeless hollow-core fiber[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 2017: SM3M.2.
- [62] Tani F, Belli F, Abdolvand A, *et al.* Generation of three-octave-spanning transient Raman comb in hydrogen-filled hollow-core PCF[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(6): 1026-1029.
- [63] Belli F, Abdolvand A, Chang W, *et al.* Vacuum-ultraviolet to infrared supercontinuum in hydrogen-filled photonic crystal fiber[J]. *Optica*, 2015, 2(4): 292-300.
- [64] Mridha M K, Novoa D, Bauerschmidt S T, *et al.* Generation of a vacuum ultraviolet to visible Raman frequency comb in H<sub>2</sub>-filled Kagomé photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(12): 2811-2814.
- [65] Wang Z F, Yu F, Wadsworth W J, *et al.* Single-pass high-gain 1.9  $\mu\text{m}$  optical fiber gas Raman laser [J]. *Acta Optica Sinica*. 2014, 34(8): 0814004. 王泽锋, 于飞, William J Wadsworth, 等. 单程高增益 1.9  $\mu\text{m}$  光纤气体拉曼激光器 [J]. *光学学报*, 2014, 34(8): 0814004.
- [66] Chen Y B, Gu B, Wang Z F, *et al.* 1.5 $\mu\text{m}$  fiber gas Raman laser source[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0506002. 陈育斌, 顾博, 王泽锋, 等. 1.5 $\mu\text{m}$  光纤气体拉曼激光光源[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0506002.
- [67] Chen Y B, Wang Z F, Gu B, *et al.* 1.5 $\mu\text{m}$  fiber ethane gas Raman laser amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(5): 0514002. 陈育斌, 王泽锋, 顾博, 等. 1.5 $\mu\text{m}$  光纤乙烷气体拉曼激光放大器 [J]. *光学学报*, 2017, 37(5): 0514002.
- [68] Wang Z F, Yu F, Wadsworth W J, *et al.* Efficient 1.9  $\mu\text{m}$  emission in H<sub>2</sub>-filled hollow core fiber by pure stimulated vibrational Raman scattering [J]. *Laser Physics Letters*, 2014, 11(10): 105807.

- [69] Wang Z F, Gu B, Chen Y B, *et al.* Demonstration of a 150-kW-peak-power, 2-GHz-linewidth, 19- $\mu\text{m}$  fiber gas Raman source [J]. *Applied Optics*, 2017, 56 (27): 7657.
- [70] Gladyshev A V, Kosolapov A F, Khudyakov M M, *et al.* 4.4- $\mu\text{m}$  Raman laser based on hollow-core silica fibre[J]. *Quantum Electronics*, 2017, 47(5): 491-494.
- [71] Li Z X, Huang W, Cui Y L, *et al.* Efficient mid-infrared cascade Raman source in methane-filled hollow-core fibers operating at 28  $\mu\text{m}$  [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(19): 4671-4674.