偏振反谐振空芯光纤

Yuxi Wang，[1] Charu Goel，[2] 和 Wonkeun Chang[1)]*

[1)]南洋理工大学电气与电子工程学院，新加坡南洋大道*50*号，邮编*639798*

[2)]南洋理工大学淡马锡实验室，新加坡南洋大道*50*号，邮编*639798*

（*电子邮箱：wonkeun.chang@ntu.edu.sg）

（日期：2026年1月5日）

在空芯光纤中实现稳健的单偏振导光一直是一项长期挑战，限制了其在精密光子系统中的应用。本文报道了首个低损耗、具偏振滤波功能的反谐振空芯光纤（反谐振空芯光纤）的实验实现。传统反谐振空芯光纤本质上支持简并的正交偏振模式，因此容易在环境扰动下发生偏振漂移。我们的双环光纤设计引入了与有损包层模式的偏振选择性共振耦合，实现了强偏振滤波，同时不影响传输效率。该光纤的偏振消光比超过21 dB，在10 m光纤长度上的传输损耗低至0.15 dB m^{-1}。该设计可扩展至不同波段，并且在机械弯曲时仍能保持偏振鉴别能力，因此非常适用于光纤陀螺仪、量子光学和偏振敏感非线性相互作用等应用。这项工作是迈向单片式偏振选择性空芯光纤系统的重要一步。

arXiv:2601.00684v1 [physics.optics] 2 Jan 2026

I. 引言

空芯光纤的最新进展正为光通信系统[1],传感器技术[2–4]和高功率激光束传输[5]领域的突破铺平道路。光在空芯中的传导具有诸多优势，例如低损耗、低延迟、低非线性、高功率损伤阈值，以及低热敏感性和电磁敏感性[6]。在各类空芯光纤中，管状包层反谐振空芯光纤（AR-HCF）因其超低传输损耗（甚至低于电信光纤的损耗）[1], 、可在倍频程带宽范围内实现宽带导光[7]、能够有效单模运行且基模（FM）面积较大[8], ，以及制造相对简单[9]而备受关注。

反谐振空芯光纤天然支持多种纤芯模式。不过，通过精心设计包层[8]引入较大的差分损耗，可以有效抑制沿光纤长度方向传播的高阶模式。在基模中，光以两种简并的正交偏振模式传播[10]。松绕的反谐振空芯光纤在静态条件下可呈现出优异的偏振纯度[11], ，但弯曲、扭转和温度变化等环境扰动可能引发偏振模式耦合[12]。这可能造成不利影响。例如，偏振漂移产生的噪声可能影响干涉式传感器（如陀螺仪）的精度；这类传感器广泛应用于飞机、航天器和船舶的导航与制导系统[13]。因此，尽管标准反谐振空芯光纤能显著提升传统光纤陀螺仪的性能，系统中仍需设置自由空间耦合偏振器，以进一步进行偏振控制[3]。这会使系统容易受到大气湍流、光学系统像差和光纤定位误差的影响，从而降低整体稳健性。以单偏振反谐振空芯光纤替代标准反谐振空芯光纤，或可实现更可靠的单体陀螺仪。同样，单偏振反谐振空芯光纤还可提升弯曲传感器或应变传感器的性能，因为机械应力可能使标准反谐振空芯光纤中的两种正交偏振基模不再简并[8]。

单偏振反谐振空芯光纤还可应用于利用充气反谐振空芯光纤中光与物质相互作用的系统，例如原子光学[14], 、偏振超连续谱产生[15], 和气体光纤激光器[16]。此外，Hong–Ou–Mandel效应和玻色子采样等量子干涉实验要求光子具有不可区分的空时模式和偏振态，以确保实现完美干涉[17,18]。单偏振反谐振空芯光纤仅允许特定的线偏振模式通过，并具有较高的偏振纯度，因此可提供有效的全光纤平台，在提升量子干涉保真度的同时，减少由未对准造成的误差[19]。它们还可用作偏振敏感光谱学和线偏振光纤激光器谐振腔中的功能性光纤元件[20–23]。

在实芯光纤中，通过引入应力诱导双折射或采用椭圆芯[24–26]，相对容易避免偏振模式耦合并确保单偏振导引。然而，由于光限制在空芯中，AR-HCF 无法实现应力诱导双折射。在标准 AR-HCF 中，基模的两个正交偏振态完全简并，双折射小于 10^{-8}[11,27]。利用双壁厚嵌套结构中基模与介质包层模之间的偏振相关相互作用，可以设计出最大双折射为 9.1×10^{-5} 的弱双折射 AR-HCF[27]。然而，这种方案无法抑制非期望偏振态中的光，因此无法确保单偏振导引。此外，双折射光纤会产生偏振模式色散，这可能导致短光脉冲失真[28]。要在空芯保偏光纤中实现高双折射，通常需要较小的纤芯尺寸[27,29], ，这限制了光纤在需要大模场面积的应用中的使用。因此，为实现稳健的单偏振导引，AR-HCF 需要具有——

提供有限的偏振相关损耗，以抑制非期望偏振态中的光[10,29–35]。

Zang等人报道了一种双壁厚单环反谐振空芯光纤，其偏振抑制效果令人瞩目，超过25 dB，且仅需一段6 cm长的光纤即可实现。然而，这种光纤的通行偏振损耗较大，限制了其作为独立偏振器件的应用[32]。要在保持通行偏振低传输损耗的同时实现显著的偏振相关损耗，需要采用具有两组相互独立结构参数的不对称光纤几何结构。已有多种反谐振空芯光纤设计在这一方向上进行了理论探索[10,29,30]。然而，其中大多数设计都要求严格控制结构参数，或涉及制造挑战显著的几何结构[10,29]。因此，迄今为止，这些设计方案均未经过实验验证。

在本研究中，我们采用双壁厚双环反谐振空芯光纤框架，展示了一种低损耗单偏振模空芯光纤[30,36,37]。具体而言，我们在双环反谐振空芯光纤结构的内包层中引入不对称性，以抑制一种基模正交偏振态，同时利用圆对称外包层实现对通行偏振的约束。

II. 设计原理与光纤几何结构

图 1a 展示了理想化单偏振双环空芯光纤（SP-DRF）的横截面。该光纤由两层包层管组成，包围着空芯[36]。我们将沿 X 轴的两个内层包层管标记为 T_2，其余所有内层和外层包层管标记为 T_1。我们将 SP-DRF 的纤芯直径定义为D，将包层管 T_1 和 T_2 的内径分别定义为d_1 和d_2, ，其壁厚分别定义为t_1 和t_2, 。

AR-HCF 通过抑制基芯模与包层模之间的耦合，使光在空芯中传输[38–40]。在介质模式截止波长附近，空芯中的模式与介质包层壁之间的共振耦合会形成典型的 AR-HCF 传输光谱，其中包括周期性出现的低损耗和高损耗光谱带，分别称为反谐振带和谐振带。谐振带边缘所在的波长由下式给出：

$$\lambda_m = \frac{2t}{m}\sqrt{n_g^2 - 1}, \tag{1}$$

其中t 为包层管的壁厚，n_g 为包层玻璃的折射率，m 为表示谐振级次的整数。在短于 λ_m的波长区域内观察到多个尖锐的损耗峰，其中每个损耗峰都对应基模与离散包层模之间的谐振耦合。在对称反谐振空芯光纤中，这种谐振模耦合不依赖偏振态，因为基模的两个正交线偏振态几乎简并。SP-DRF内包层层中的不对称性打破了这种简并，使谐振耦合呈现偏振依赖性。壁厚t_2 的选择使得工作波长位于共振带的短波长边缘，该共振带对应T_2 管。SP-DRF中的结构不对称性所引入的双折射确保在此波长下，只有基模的X偏振会与介质包层模耦合，而Y偏振则得到良好导引。壁厚t_1 的选择使工作波长位于T_1 管的反谐振带内，从而支持Y偏振在空芯中的限制。因此，如图1b所示，SP-DRF可同时实现基模Y偏振的低损耗传输和基模X偏振的高损耗传输。

图1c展示了采用堆叠拉制法制造的 SP-DRF 横截面的扫描电子显微图像[37]。该光纤的 D =36μm、t_1 = 1.30 ± 0.02 μm 和 d_1/D = 0.71 ± 0.01。此d_1/D 值能够有效抑制高阶纤芯模式，从而使 SP-DRF 实现有效的单模导引[8]。由于制造挑战，两个 T_2 管中的t_2 和d_2 略有不同。一个管的$t_2 = 2.41 \pm 0.01$ 为 μm，d_2/D =0.65 ± 0.01；另一个管的t_2 = 2.36 ± 0.01 为 μm，且$d_2/D = 0.62 \pm 0.01$。

III. 实验装置

图2为测量 SP-DRF 偏振相关特性的实验装置示意图。超连续谱激光束通过线偏振器，将光源发出的椭圆偏振光转换为线偏振光。使用宽带半波片（HWP）旋转线偏振光的偏振面。经过 HWP 的线偏振光耦合至 SP-DRF，输出光直接由光谱分析仪进行分析，以研究 SP-DRF 的偏振响应[41,42]。偏振面的旋转角度 θ 设定为使 $\theta = 0°$ 和 180°对应于 SP-DRF 的最小透射输出功率，而 $\theta = 90°$ 对应于最大透射输出功率，分别代表阻断偏振和通过偏振。

IV. 结果与讨论

图 3(a) 绘出了长度为 3 m 的 SP-DRF 在 θ 从 0° 到 180° 、步长为 10° 时的透射光谱。清晰可见与 T_1 对应的反谐振带和共振带。由 T_2引起的第四和第三谐振带分别以 1266 nm 和 1638 nm 为中心。约 1266 nm 处的共振带与 T_1, 的一个共振带重叠，这表明基模的 X 偏振和 Y偏振均遭受较高的传输损耗，因此在此波长范围内没有偏振相关行为。然而，T_2 的第三谐振带与 T_1的一个反谐振带重叠。因此，我们观察到由 T_2 引起的强偏振相关透射，其出现在以 1638 nm 为中心的共振带的短波长边缘。

我们可以在波长范围1500nm–

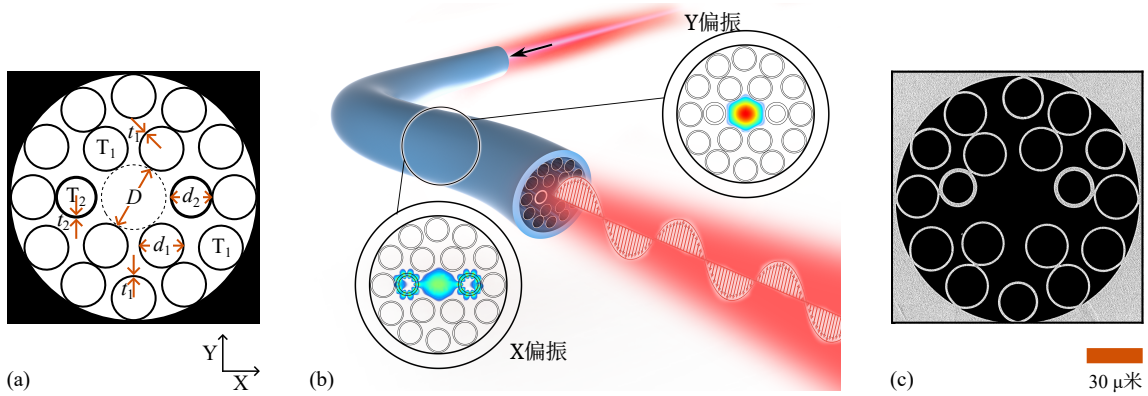


图 1. (a) 理想化的单偏振双环空芯光纤（SP-DRF）横截面示意图。(b) SP-DRF 工作原理示意图。(c) 扫描电 SP-DRF 横截面的电子显微图像。

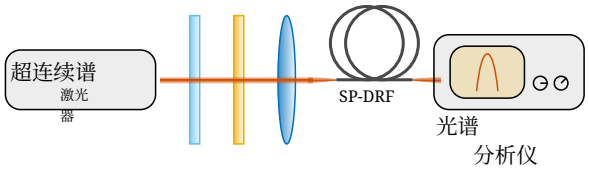


图2. 用于研究 SP-DRF 偏振相关特性的实验装置。

1600 nm内看到三个明显的偏振相关损耗峰，分别标记为A、B和C，位置如图3(b)所示。它们对应于FM的X偏振与不同介质包层模之间的共振耦合。Y偏振光束几乎平坦的透射曲线，即$\theta = 90°$，表明其沿光纤进行低损耗传输。X偏振的共振诱导的高损耗峰与Y偏振的低损耗反谐振导引同时存在，这可归因于X方向上的两个T_2 管所诱导的共振耦合，以及SP-DRF其余管子提供的强光约束。另有一个以1595 nm为中心、标记为D的单偏振峰。该波长位于T_2, 的共振带深处，因此即使对于Y偏振，损耗也相对较高。因此，在该波长下，这种光纤只能用作短长度离散偏振器。另一方面，在对应于A、B和C的波长下运行，适用于需要长距离单偏振导引空芯光纤的应用。

我们研究了不同光纤长度下 SP-DRF 的偏振响应。测量了不同光纤长度下，输入偏振角度变化时的透射光谱。我们还计算了偏振消光比（PER），其定义为线偏振光束中通行偏振与阻偏振的透射功率之比[41]。结果如图4所示。我们观察到三个明显的单偏振波长，分别位于图3(b)中的 A、B 和 C 附近。由于偏振相关损耗会沿光纤累积，使用较长的光纤通常会提高 PER。对于所研究的最长光纤长度——10 m 长的 SP-DRF，最大 PER 出现在 B 附近。追踪不同 SP-DRF 长度下 B 附近的峰值，我们观察到：1 m 长光纤在 1534 nm 处的 PER 为 9.1 dB，2 m 长光纤在 1533.5 nm 处为 12 dB，3 m 长光纤在 1533 nm 处为 16.2 dB，10 m 长光纤在 1526 nm 处为 21.1 dB。对于 10 m 光纤，PER 为 >12 dB 的偏振窗口带宽为 10 nm，中心波长为 1526.5 nm。这些结果首次展示了偏振型反谐振空芯光纤在米级长度光纤中通行偏振下的低损耗传输。

改变光纤长度时，我们观察到峰值偏振消光比波长在 B 附近发生偏移。这是由于通行偏振在不同波长处的损耗发生变化所致。正如我们将看到的，在所研究的光谱范围内，1526nm 是通行偏振损耗最低的波长。因此，长度为 10m 的光纤，其峰值偏振消光比出现在 1526 nm。

图4的另一项重要观察结果是，偏振消光比不会随光纤长度线性增加。也就是说，尽管偏振相关损耗峰会随光纤长度增加而加深，但这种变化并非线性。相反，峰的光谱宽度会增大。这归因于t_2 沿光纤长度不可避免的波动；在拉丝过程中，由于拉丝参数（例如温度和压力）的细微变化，这种情况很常见。我们的计算表明，t_2 仅相差 ± 10 nm，就可能导致第三谐振带偏移约 ± 7 nm。事实上，这有助于拓宽 SP-DRF 的工作光谱范围。

SP-DRF 的主要优点之一是其对通行偏振的低损耗导引。由于 Y偏振在偏振波长带内始终具有低损耗反谐振导引，因此 SP-DRF 可在数米长度内保持单偏振导引。我们采用截断法测量通行偏振的传输损耗。首先测量了 10 m 长光纤输出端的透射光谱，随后将光纤截短至 1 m，再测量其输出端的透射光谱。相应的损耗光谱如图5所示。从 1500 到 1554 nm 的整个偏振窗口内，通行偏振的损耗低于 0.6 dB m^{-1}。波长大于 1554 nm 时，损耗显著增大，这是因为这些波长接近

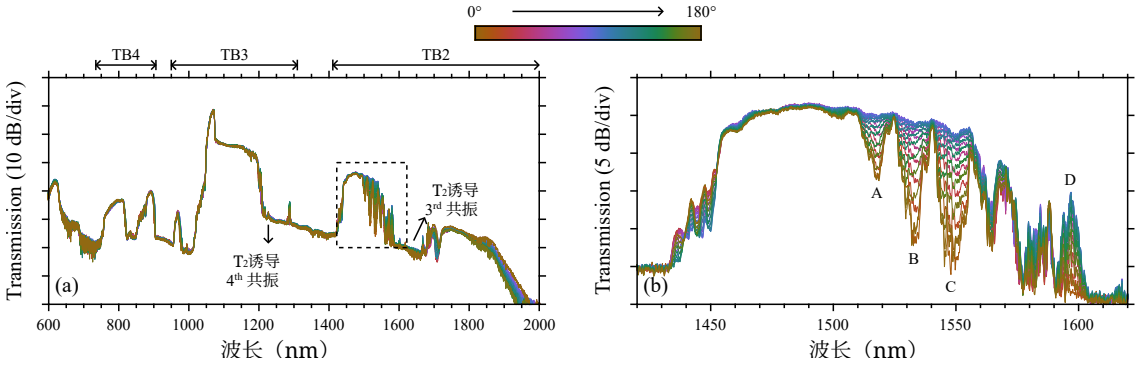


图3. (a) 向3 m长的SP-DRF中注入线偏振光时，不同偏振方向对应的透射光谱。TB2、TB3和TB4分别表示T_1的第二、第三和第四透射带。T_2 管的第三谐振带位于T_1 的第二透射带（TB2）内，从而能够实现高度的偏振控制。(b) 波长范围为1420至1620 nm的放大图。

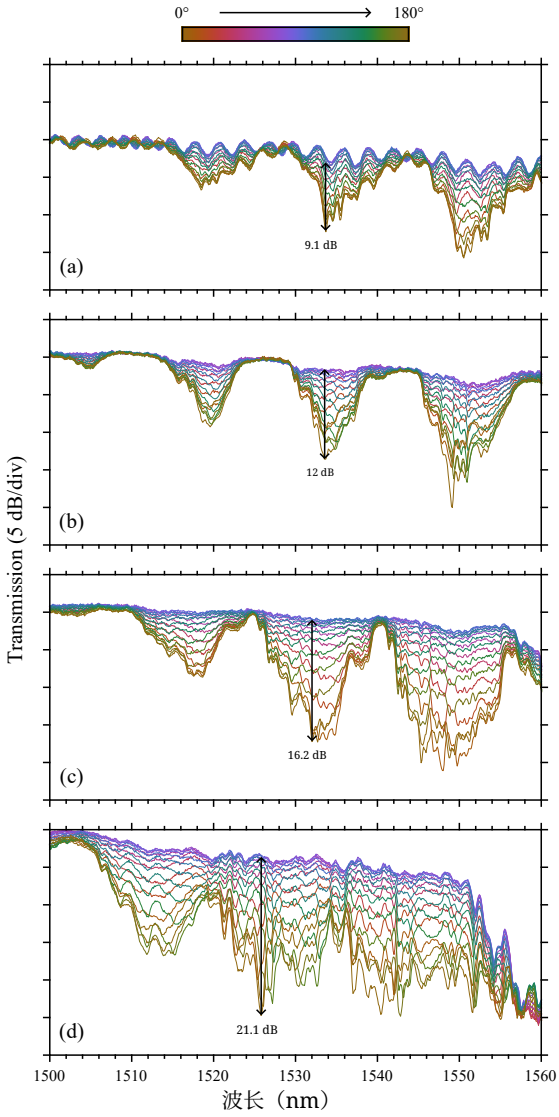


图4. 向(a) 1 m长、(b) 2 m长、(c) 3 m长和(d) 10 m长的SP-DRF中注入线偏振光时，不同偏振方向对应的透射光谱。

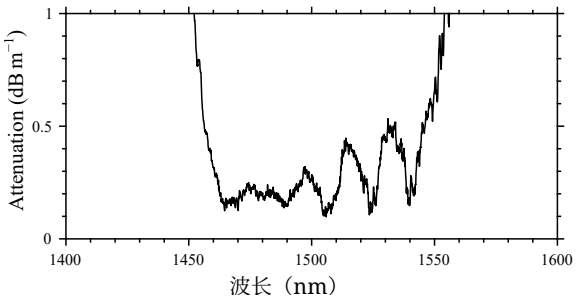


图5. 根据截断法测量计算得到的损耗光谱。

由t_2引起的共振带。在偏振窗口内，1526 nm 处测得的最低损耗为 0.15 dBm^{-1}。值得注意的是，偏振窗口内通行偏振的损耗并未显著高于远离t_2所引起共振带的波长处（即 1465 nm–1490 nm）的损耗。这表明双包层结构提供了出色的约束能力，从而实现通行偏振的低损耗反谐振导引。

我们将实验观测结果与数值模拟进行了对比验证。图6展示了SP-DRF中基模的X偏振和Y偏振模拟限制损耗。参数组考虑了两个包层层之间节点处包层管重叠所导致的制造误差。该误差通过t_0/t_1, 量化，如左下插图所示。我们根据制备的样品设定$t_0/t_1 = 0.25$ 。我们观察到标记为A、B和C的三个区域，其中X偏振的损耗远高于Y偏振。这与图4中讨论的三个偏振相关透射凹陷吻合良好。右下插图展示了1547.5 nm处X偏振和Y偏振的模式分布，表明X偏振与T_2 管的介质模式强烈耦合，而双环包层对Y偏振具有出色的限制能力。在1547.5 nm处，X偏振与Y偏振之间的模拟损耗比最高可达2595，对应于单位长度偏振消光比为33.6 dB。通行偏振的模拟损耗显著低于

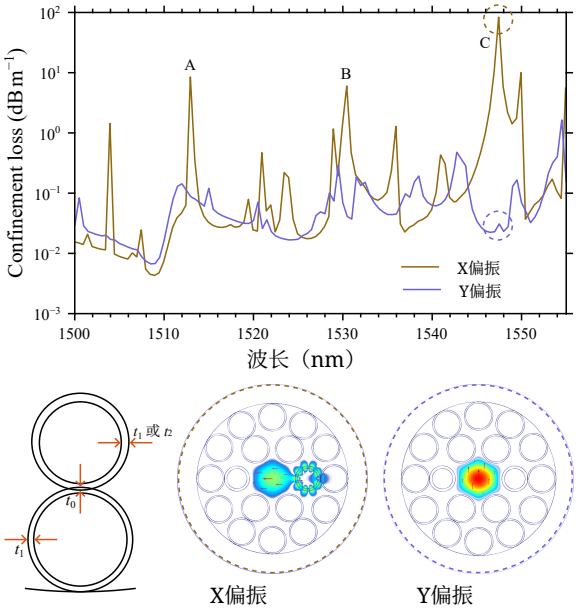


图6. SP-DRF中基模X偏振和Y偏振的模拟限制损耗。仿真采用图1c所示的制备光纤几何结构，其中D = 36μm、d_1/D = 0.72、d_2/D = 0.65、t_1 1.3 μm，而两个T_2管的t_2 = 2.41 分别为.36 μm。如左下角插图所示，两层相邻管之间的节点处不可避免地存在玻璃重叠。穿透深度t_0/t_1 设为0.25。右下角插图展示了1547.5 nm处X偏振和Y偏振的强度分布。

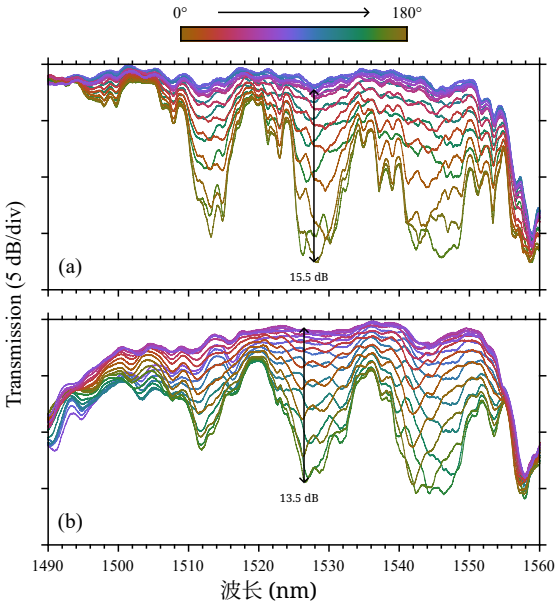
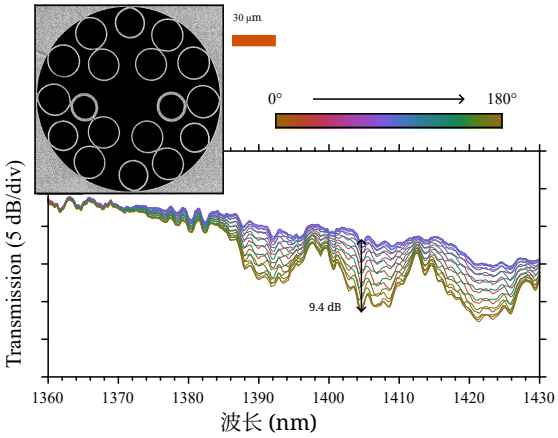


图 7. 2 m 长的 SP-DRF 在不同输入偏振角下的透射光谱：(a) 弯曲半径为 10 cm 的两圈盘绕；(b) 弯曲半径为 5 cm 的四圈盘绕。

制备光纤的测量值。这种差异归因于光纤制备中的缺陷，尤其是SP-DRF中两个T_2 包层管尺寸的差异。此外，T_2 包层管的壁厚沿光纤长度方向略有波动。因此，与图6模拟光谱中的尖锐损耗峰相比，图4所示制备光纤的偏振窗口更宽。我们还注意到，SP-DRF中的两个包层管彼此接触，形成了节点并产生额外的共振。然而，这些共振波长远在所研究偏振窗口之外，因此不会显著影响结果。通过优化制备条件，可以实现完全均匀且互不接触的包层管配置[37]。



2 =

图 8. 2 m 长、t2.17 μm 的 SP-DRF 在不同输入偏振角下的透射光谱。

为在紧凑配置下进行现场部署，SP-DRF需要盘绕。已知机械弯曲会导致折射率失真，并进一步促进折射率匹配诱导的共振耦合[43,44]，，因此我们研究了SP-DRF在机械弯曲条件下的偏振特性。单偏振导光得以保持。图7a和7b显示，长度为2 m的SP-DRF分别绕成两圈和四圈、弯曲半径分别为10 cm和5 cm时，仍可实现15.5 dB和13.55 dB的偏振消光比。性能略有提升，这可归因于弯曲降低了两个正交基模的简并度[45]。

SP-DRF 的设计原理具有普适性，通过缩放光纤横截面的几何参数，可以将单偏振导光的波长带移至任意所需范围。这是因为介质包层模与单一偏振之间的谐振耦合完全取决于t_2。为验证这一点，我们制备了另一种SP-DRF，其参数与图 1a 所示光纤相近，但 T_2 壁厚更薄，为t_2 =2.17 μm。图 8 所示的透射光谱表明，单偏振带蓝移了 130 nm，证实了该光纤设计策略具有普适性。

V. 结论

我们提出并通过实验验证了首种基于双环包层结构的低损耗单偏振反谐振空芯光纤。在 C 波段，该光纤展现出优异的单偏振模式导引，偏振消光比最高可达 21.3 dB，通行偏振的传输损耗低至 0.15 dBm^{-1}。得益于双环结构中外层包层管提供的强约束，单偏振导光与通行偏振的低传输损耗能够同时实现。该设计原理具有普适性，只需改变包层管壁厚即可调节工作波长。研究发现，SP-DRF 的单偏振导光能够稳健抵御机械弯曲造成的应力。

致谢

作者谨此感谢新加坡教育部通过资助项目 MOE-T2EP50122-0019 提供的支持。

作者声明

作者没有需要披露的利益冲突。

数据可用性声明

支持本研究结论的数据可在合理请求后向通讯作者获取。

参考文献

[1]Y. Chen、M. N. Petrovich、E. N. Fokoua、A. I. Adamu、M. R. A. Hassan、H. Sakr、R. Slavík、S. B. Gorajoobi、M. Alonso、R. F. Ando等，“具有 <0.11 db/km损耗的空芯双嵌套反谐振无节点光纤”，载于*2024*年光纤通信会议（*OFC*）（Optica 出版集团，2024），第Th4A–8页。[2]M. A. Terrel、M. J. Digonnet和S. Fan，“采用空芯光纤的谐振式光纤陀螺仪”，《光波技术杂志》**30**，931–937（2012）。[3]G. A. Sanders、A. A. Taranta、C. Narayanan、E. N. Fokoua、S. A. Mousavi、L. K. Strandjord、M. Smiciklas、T. D. Bradley、J. Hayes、G. T. Jasion等，“采用无节点反谐振光纤的空芯谐振腔光纤陀螺仪”，《光学快报》**46**，46–49（2021）。[4]P. S. J. Russell、P. Hölzer、W. Chang、A. Abdolvand和J. C. Travers，“用于气体非线性光学的空芯光子晶体光纤”，《自然·光子学》**8**，278–286（2014）。[5] H. C. H. Mulvad、S. A. Mousavi、V. Zuba、L. Xu、H. Sakr、T. D. Bradley、J. R. Hayes、G. T. Jasion、E. N. Fokoua、A. Taranta等，“在公里级空芯光纤上实现千瓦级平均功率的单模激光传输”，《自然·光子学》**16**，448–453（2022）。[6]B. Debord、F. Amrani、L. Vincetti、F. Gérôme和F. Benabid，“空芯光纤技术：‘气体光子学’的兴起”，《光纤》**7**，16（2019）。[7]J. R. Hayes、S. R. Sandoghchi、T. D. Bradley、Z. Liu、R. Slavík、M. A. Gou-veia、N. V. Wheeler、G. Jasion、Y. Chen、E. N. Fokoua等，“具有跨倍频程带宽、适用于短途数据通信的反谐振空芯光纤”，《光波技术杂志》**35**，437–442（2017）。[8]P. Uebel, M. C. Günendi, M. H. Frosz, G. Ahmed, N. N. Edavalath, J.-M. Ménard, 和 P. S. J. Russell，《通过共振滤除高阶模式实现宽带、稳健单模空芯光子晶体光纤》，《光学快报》41，1961–1964（2016）。[9]F. Yu 和 J. Knight，《负曲率空芯光纤》，IEEE《量子电子学专题精选期刊》22，1–11（2016）。[10]C. Wei、C. R. Menyuk 和 J. Hu，《具备偏振滤波和偏振保持特性的低损耗负曲率光纤》，《光学快报》26，9528–9540（2018）。[11]A. Taranta、E. N. Fokoua、S. A. Mousavi、J. R. Hayes、T. D. Bradley、G. T. Jasion 和 F. Poletti，《反谐振空芯光纤具有卓越的偏振纯度》，《自然·光子学》14，504–510（2020）。[12]C. Röhrer、J. H. Osório、F. Beirow、M. Maurel、B. Debord、T. Graf、F. Gérôme、F. Benabid 和 M. A. Ahmed，《弯曲引起的相移导致抑制耦合导引空芯光纤偏振性能劣化》，IEEE《光子技术快报》31，1362–1365（2019）。[13]Y. Yan、H. Ma 和 Z. Jin，《采用单偏振光纤降低谐振式光纤陀螺中偏振波动引起的漂移》，《光学快报》23，2002–2009（2015）。[14]S. Okaba、T. Takano、F. Benabid、T. Bradley、L. Vincetti、Z. Maizelis、V. Yampol’skii、F. Nori 和 H. Katori，《空芯光子晶体光纤中原子的朗道-迪克光谱学》，《自然·通讯》5，4096（2014）。[15]A. I. Adamu、M. S. Habib、C. R. Petersen、J. E. A. Lopez、B. Zhou、A. Schülzgen、M. Bache、R. Amezcua-Correa、O. Bang 和 C. Markos，《气体填充空芯光纤中由中红外超短脉冲驱动的深紫外至中红外超连续谱产生》，《科学报告》9，4446（2019）。[16]Y. Wang、C. Zhang、J. E. Antonio-Lopez、R. A. Correa 和 C. Markos，《用于气体光谱学和成像的气体填充空芯光纤激光器》，载于《光纤激光器 XX：技术与系统》（SPIE，2023），第106–113页。[17]R. Lopes、A. Imanaliev、A. Aspect、M. Cheneau、D. Boiron 和 C. I. Westbrook，《原子洪–欧–曼德尔实验》，《自然》520，66–68（2015）。[18]J. B. Spring、B. J. Metcalf、P. C. Humphreys、W. S. Kolthammer、X.-M. Jin、M. Barbieri、A. Datta、N. Thomas-Peter、N. K. Langford、D. Kundys 等，《光子芯片上的玻色子采样》，《科学》339，798–801（2013）。[19]J. C. Loredo、N. A. Zakaria、N. Somaschi、C. Anton、L. D. Santis、V. Giesz、T. Grange、M. A. Broome、O. Gazzano、G. Coppola 等，《固态单光子源的可扩展性能》，《Optica》3，433–440（2016）。[20]N. Prokopi、K. S. Andrikopoulos、A. S. Beobide、G. A. Voyiatzis 和 D. J. Papachristou，《偏振拉曼光谱探测胶原取向，可作为区分不同程度半月板退变的鉴别诊断指标》，《科学报告》11，20299（2021）。[21]K. Sokolov、R. Drezek、K. Gossage 和 R. Richards-Kortum，《偏振光反射光谱：对细胞和细胞核形态是否敏感？》，《光学快报》5，302–317（1999）。[22]R. Lv、T. Chen、X. Pham、J. Si、J. Huang、Y. Hou、B. Gao 和 X. Hou，《基于飞秒激光制备的非保偏光纤布拉格光栅的高温线偏振单频光纤激光器》，《光学快报》47，4111–4114（2022）。[23]E. A. Zlobina、S. I. Kablukov 和 S. A. Babin，《具有极限效率的线偏振随机光纤激光器》，《光学快报》40，4074–4077（2015）。[24]J. Noda、K. Okamoto 和 Y. Sasaki，《保偏光纤及其应用》，《光波技术杂志》4，1071–1089（1986）。[25]T. Schreiber、F. Röser、O. Schmidt、J. Limpert、R. Iliew、F. Lederer、A. Petersson、C. Jacobsen、K. P. Hansen、J. Broeng 等，《应力诱导的低非线性单偏振单横模光子晶体光纤》，《光学快报》13，7621–7630（2005）。[26]H. Yan、S. Li、Z. Xie、X. Zheng、H. Zhang 和 B. Zhou，《具有 10 5、1 5 2017 保偏模式的熊猫型环芯光纤设计》，《光子学研究》–（）。[27]Y. Hong、S. Gao、W. Ding、X. Zhang、A. Jia、Y. Sheng、P. Wang 和 Y. Wang，《具有双厚度四重半管结构的高双折射反谐振空芯光纤》，《激光与光子学评论》16，2100365（2022）。[28]W. K. Burns 和 R. P. Moeller，《高双折射光纤中偏振模色散的测量》，《光学快报》8，195–197（1983）。[29]S. A. Mousavi、S. R. Sandoghchi、D. J. Richardson 和 F. Poletti，《宽带高双折射偏振空芯反谐振光纤》，《光学快报》 24，22943–22958（2016）。[30]S. Yan、S. Lou、W. Zhang 和 Z. Lian，《单偏振单模双环空芯反谐振光纤》，《光学快报》26，31160–

31171（2018）。[31]J. M. Fini、J. W. Nicholson、B. Mangan、L. Meng、R. S. Windeler、E. M. Monberg、A. DeSantolo、F. V. DiMarcello 和 K. Mukasa，《保偏单模低损耗空芯光纤》，《自然·通讯》**5**，5085（2014）。[32]J. Zang、C. Goel、M. R. A. Hassan、W. Chang 和 S. Yoo，《反谐振空芯在线光纤偏振器》，《光波技术杂志》**40**，5689–5697（2022）。[33]S. Liu、L. Zhang、M. Tian、T. Yang 和 Y. Dong，《基于负介电常数、宽带单偏振单模空芯反谐振光子晶体光纤》，《光学快报》**29**，15664–15677（2021）。[34]X. Zhao、J. Xiang、X. Wu 和 Z. Li，《高双折射、单偏振、低损耗空芯反谐振光纤》，《光学快报》**29**，36273–36286（2021）。[35]M. S. Habib、A. I. Adamu、C. Markos 和 R. Amezcua-Correa，《传统及混合反谐振空芯光纤中的双折射增强》，《光学快报》**29**，12516–12530（2021）。[36]Y. Wang、M. I. Hasan、M. R. A. Hassan 和 W. Chang，《反谐振管的第二环对负曲率光纤的影响》，《光学快报》**28**，1168–1176（2020）。[37]Y. Wang、M. R. A. Hassan 和 W. Chang，《双环负曲率空芯光纤的制造与表征》，载于《激光与光电子学会议（*CLEO*）*2021*（Optica 出版集团，2021），第 STu1Q–3 页。

[38]M. A. Duguay、Y. Kokubun、T. L. Koch 和 L. Pfeiffer，“硅氧化物–硅多层结构中的反谐振反射光波导”，《应用物理快报》**49**，13–15（1986）。[39]N. M. Litchinitser、A. K. Abeeluck、C. Headley 和 B. J. Eggleton，“反谐振反射光子晶体光波导”，《光学快报》**27**，1592–1594（2002）。[40]B. Debord、A. Amsanpally、M. Chafer、A. Baz、M. Maurel、J. M. Blondy、E. Hugonnot、F. Scol、L. Vincetti、F. Gérôme，等，“抑制耦合导光空芯光纤中的超低传输损耗”，《Optica》**4**，209–217（2017）。[41]Q. Bao、H. Zhang、B. Wang、Z. Ni、C. H. Y. X. Lim、Y. Wang、D. Y. Tang 和 K. P. Loh，“宽带石墨烯偏振器”，《自然·光子学》**5**，411–415（2011）。[42]J. R. Feth 和 C. L. Chang，“金属包层光纤截止偏振器”，《光学快报》**11**，386–388（1986）。[43]M. H. Frosz、P. Roth、M. C. Günendi 和 P. S. J. Russell，“单环空芯光子晶体光纤弯曲损耗的解析公式”，《光子学研究》**5**，88–91（2017）。[44]L. Vincetti 和 V. Setti，“管格光纤中的导波机制”，《光学快报》**18**，23133–23146（2010）。[45]C. Wei、C. R. Menyuk 和 J. Hu，“弯曲诱导的模式非简并与耦合：硫系负曲率光纤”，《光学快报》**24**，12228–12239（2016）。