用于主动同步的真空化反谐振空芯光纤中微焦耳级超快脉冲的高稳定性、灵活传输

严川川,[1,2,†] 李洪洋,[2,3,†] 黄志远,[2,7] 王新亮,[2] 刘东涵,[2] 刘星妍,[2] 潘锦宇,[2] 罗卓昭,[1,2,4] 杨飞,[5] 郑宇,[6] 尹若辰,[6] 余海湖,[1] 冷雨欣,[2] 宋立伟,[2,8] 庞萌,[2,4] 和姜欣,[1,4,*]

[1]武汉理工大学光纤传感技术与网络国家工程研究中心，中国武汉*430070*[2]中国科学院强场激光物理国家重点实验室和中国科学院超强激光科学卓越创新中心，中国科学院上海光学精密机械研究所（*SIOM*），中国上海*201800*[3]同济大学物理科学与工程学院，中国上海*200092*[4]罗素先进光波科学中心，中国科学院上海光学精密机械研究所和杭州光学精密机械研究所，中国杭州*311400*[5]空间激光通信与探测技术重点实验室，中国科学院上海光学精密机械研究所，中国上海*201800*[6]艾菲博（宁波）光电科技有限公司，中国宁波*315000*[7]电子邮箱：*huangzhiyuan@siom.ac.cn*[8]电子邮箱：*slw@siom.ac.cn* *通讯作者：*jiangx@whut.edu.cn*；当前电子邮箱：*xin.jiang@r-cals.com*

[†]这些作者对本通信作出了同等贡献。

我们展示了通过一段长达~10米、经真空处理的反谐振空芯光纤（AR-HCF），稳定而灵活地传输多-μ焦耳、亚200飞秒脉冲，并成功将其用于高性能脉冲同步。与耦合进入AR-HCF的脉冲列相比，光纤输出的脉冲列在脉冲功率和光谱方面表现出极佳的稳定性，指向稳定性也大幅提升。在开环状态下，光纤传输的脉冲列与其他经自由空间传播的脉冲列之间的走离，在90分钟内测得为 <6 飞秒均方根（RMS），对应的相对光程变化为 $<2\times10^{-7}$。只需使用主动控制环路，便可将这种走离进一步抑制至~2 飞秒RMS，凸显了这套AR-HCF装置在大型激光与加速器设施中的巨大应用潜力。

基于超快光学脉冲主动同步的定时分发技术，已广泛应用于各类大型激光与加速器设施，为时间精度带来了前所未有的提升 [1-5]。例如，在拍瓦级超强激光设施[6], 中，光学脉冲的高质量定时同步在泵浦-探测实验中发挥着关键作用，可确保脉冲充分重叠并相互作用 [3]。定时分发系统的一项核心要求是稳定传输超快脉冲，传输距离还要足够远。尽管光纤被广泛认为是实现稳定、灵活光波传输的理想介质 [5,7,8], ，但要通过传统石英芯光纤高性能传输钛宝石激光系统产生的 μJ 级超快脉冲，已被证明难以实现。这类高能超快脉冲的超高峰值功率会迅速导致石英光纤纤芯中非线性累积过量，造成脉冲结构和光学光谱严重畸变。受此限制，以往基于光纤的定时分配系统通常工作于亚 nJ 级脉冲能量，脉冲宽度从数百 fs 到数 ps 不等 [5,9]。尽管近期已有一些尝试，利用反谐振空芯光纤（AR-HCF）实现高能脉冲的无非线性传输 [10], ，但迄今尚无关于此类空芯光纤（HCF）用于超快脉冲同步性能的系统研究报道。

在本文中，我们展示了一种超快激光脉冲主动同步装置，其中一段长 9.6 米的真空化反谐振空芯光纤可灵活、高性能地传输 μ 焦耳级、脉宽小于 200 fs 的脉冲。在光纤的真空芯中，非线性光谱展宽效应被彻底抑制；而由于空心波导的色散较小，脉冲时间宽度略有减小。无需色散补偿或自动对准元件，反谐振空芯光纤输出的脉冲列在光谱和平均功率方面均表现出极佳的稳定性，且

指向稳定性从 ~6 μrad 提高至 <1 μrad。我们使用平衡光学互相关器（光学互相关器）装置，测量了这束由空心光纤传输的光束与实验室环境中另一束经自由空间传播的光束之间的长期走离。结果表明，在 90 分钟内，定时抖动的均方根值为 5.23 fs，对应的相对光程变化仅为百万分之 0.2。采用主动控制环路后，这种开环光程变化进一步降至百万分之 0.1 以下，使定时同步精度达到 ~2 fs（均方根）。

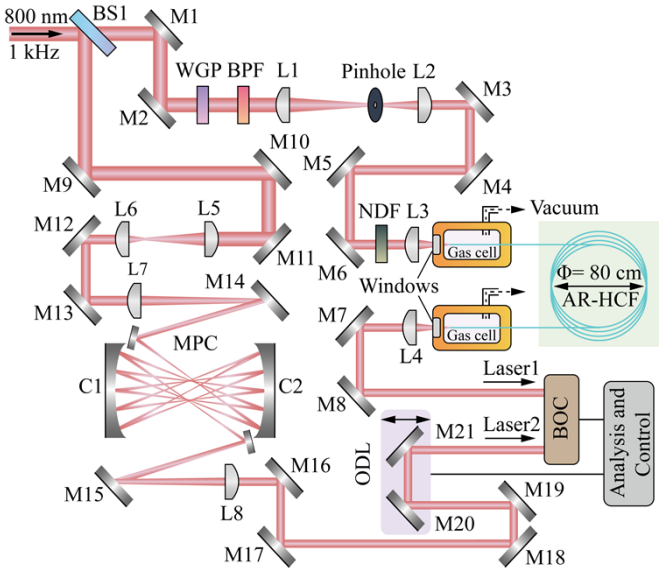

图 1. 实验装置。BS1，分束器；M1-M21， 银镜；WGP，线栅偏振片；BPF， 带通滤光片；L1-L8，平凸透镜；C1-C2，凹面镜；NDF，中性密度滤光片；AR-HCF，反谐振空芯光纤；MPC，多程腔；BOC，平衡光学互相关器；ODL，光学延迟线。

实验所用装置如图 1 所示。脉冲来自一套高能光学参量放大器钛宝石激光系统，其中心波长为 800 nm，脉冲宽度为 ~35 fs，平均功率为 ~470 mW，重复频率为 1 kHz。如图 1 所示，脉冲列通过一个 10:90 分束器（BS1），透射脉冲（90%）的能量由线栅偏振片（WGP）控制。采用带通滤光片（BPF）将 800 nm 处带宽为 10 nm 的脉冲光谱收窄，使脉冲宽度从 ~35 fs 展宽至 ~200 fs。收窄脉冲光谱可有效抑制脉冲在反谐振空芯光纤中传输时因光纤色散导致的时间展宽。为改善脉冲列的光束质量（见图 2(b) 和图 2(c)），装置中使用了一个空间滤波器，该滤波器由一个直径为 150 μm 的针孔和两枚镀膜平凸透镜组成，透镜焦距分别为 1 m（L1）和 0.4 m（L2）。

经过空间滤波器的脉冲列随后通过一枚镀膜平凸透镜（焦距 7.5 cm，L3）耦合进入一段长 9.6 m 的抽真空的反谐振空芯光纤。输入脉冲的能量可通过可变中性密度滤光片（NDF）调节。实验中，反谐振空芯光纤盘绕成直径为 ~80 cm 的线圈，其两端分别安装在两个气室内，两个气室均连接至真空泵（ISP-250C，IWATA），并以厚度为 5 mm 的熔融石英窗密封。图2(a)的插图展示了反谐振空芯光纤的扫描电子显微镜（SEM）图像，其纤芯直径为 ~30 μm，壁厚为 ~520 nm。图2(a)中，采用截断法测得反谐振空芯光纤的损耗曲线（红色实线），在 800 nm 处的损耗为 ~0.27 dB/m（蓝色虚线），在 1550 nm 处的损耗为 ~0.11 dB/m（紫色虚线）。浅绿色条表示波长范围为 790 至 860 nm 时的光纤损耗。测得耦合进入反谐振空芯光纤的效率为 ~85%。输入脉冲能量为 8 μJ（平均功率为 8 mW）时，测得反谐振空芯光纤的输出脉冲能量为 3.4 μJ。光纤传输段的总插入损耗为 ~3.7 dB，输出脉冲列的近场光束分布如图 2(d)所示。

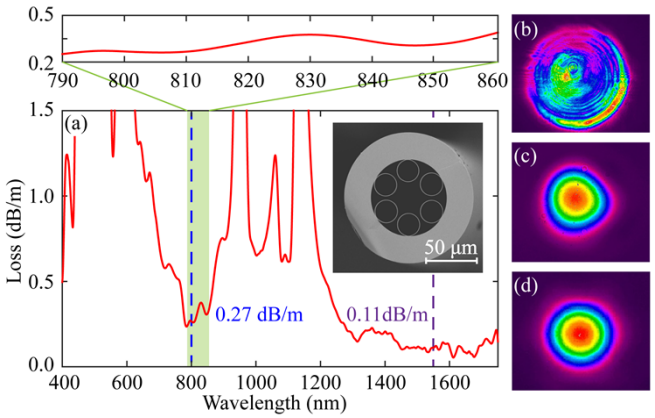

图2. (a) AR-HCF 的测量损耗（红色实线）；蓝色和紫色虚线分别表示 800 nm 和 1550 nm 处的光纤损耗，分别为 0.27 dB/m 和 0.11 dB/m。浅绿色条表示 790 至 860 nm 波长范围内的光纤损耗。插图为纤芯直径为 30 μm 的 AR-HCF 扫描电子显微镜图像。(b、c、d) 近场光束剖面：(b) BS1 前；(c) 和 (d) 分别为 AR-HCF 的输入端和输出端。

在实验中，我们逐渐将耦合进入反谐振空芯光纤的脉冲能量从 2 J 增至 8 μJ，并测量了不同脉冲能量下的输入和输出脉冲光谱。结果如图3所示。未进行真空抽气时，光纤空芯内充满了压力为 ~1 bar 的空气。在 μJ 量级的脉冲能量下，气体非线性足以导致明显的脉冲光谱展宽和畸变，如图 3(a)所示。空气中的氧分子和氮分子是拉曼活性气体，可导致脉冲波长红移，见图3(a)。由于拉曼效应不断累积，随着脉冲能量从 2 J 增至 8 μJ，红移后的波长从 ~836 增至 ~880 nm。值得注意的是，随着脉冲能量增大，拉曼频移分量移向更长波长时，其强度逐渐降低，这主要是因为这些较长波长处的光纤损耗更高 [见图2(a)]。当脉冲能量高于 2 μJ 时，除拉曼频移分量外，输出脉冲光谱上还出现了几个强度相对较低的光谱尖峰，见图3(a)。这主要是因为气体非线性导致脉冲发生孤子自压缩和分裂 [11]。当对空芯

光纤进行抽真空后，这种由非线性引起的脉冲畸变可得到有效抑制。如图3(b)所示，在脉冲能量最高达 8 μJ 时，反谐振空芯光纤的输出脉冲光谱几乎保持不变。

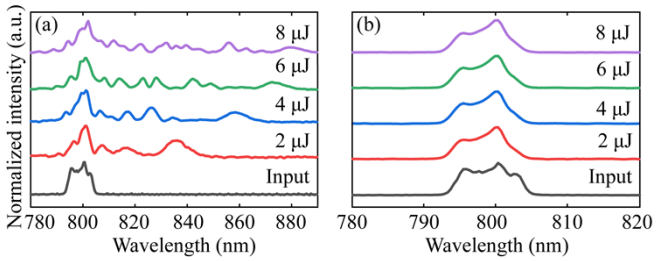

图 3. AR-HCF 输出光谱随输入脉冲能量的变化。（a）充空气的反谐振空芯光纤；（b）抽真空的反谐振空芯光纤。（a）和（b）中的黑色实线表示输入脉冲光谱。

这些稳定的光学光谱表明，输出脉冲具有洁净的时间轮廓，这一点已在我们的实验中得到验证。我们使用二次谐波频率分辨光学门控（二次谐波频率分辨光学门控）装置，在输入脉冲能量为 8 μJ 时测量了 AR-HCF 前后的脉冲时间轮廓，结果如图 4 所示。反演得到的频率分辨光学门控迹线与测量结果吻合良好[见图 4(a)、4(b)、4(d) 和 4(e)]，，反演得到的脉冲半高全宽分别为 197 fs 和 167 fs[见图 4(c) 和 4(f)]。脉冲宽度的这一轻微减小可以解释为：输入脉冲的宽度为 197 fs，具有一定的正啁啾，该啁啾被空芯光纤的反常色散部分补偿。

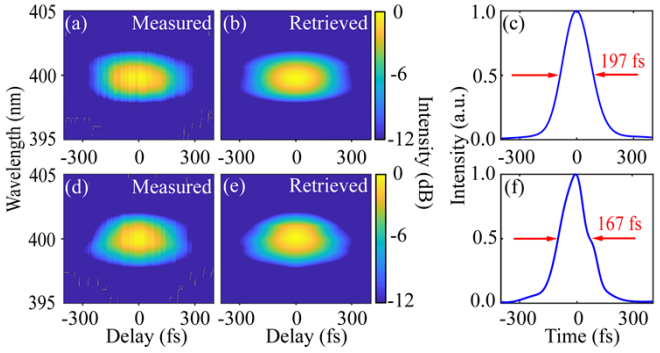

图 4. AR-HCF 输入端（a–c）和输出端（d–f）脉冲的时域表征。（a、d）测得的 SHG-FROG 迹线。（b、e）重构的 SHG-FROG 迹线。两种情况下的 FROG 误差均为 ~0.3%。（c、f）重构的时间轮廓。

在实验中，我们还分别测量了 AR-HCF 输入端和输出端脉冲列的功率、指向和光谱稳定性。结果如图 5 所示。如图 5(a) 和 5(d) 所示，当输入功率为 5.16 mW 时，输出功率为 2.16 mW。为评估功率波动，我们记录了 30 分钟内的激光平均功率，并计算变异系数（定义为标准差与平均值之比）；输入和输出脉冲列的变异系数分别为 0.998% 和 1.009%。

几乎相同的功率波动值表明，AR-HCF 能够稳定传输高能超快脉冲。

随后，我们使用焦距为 10 cm 的透镜，将输入和输出脉冲列聚焦到电荷耦合器件相机上，在 30 分钟内测量两束光的指向稳定性。如图 5(b) 所示，输入脉冲列在两个正交方向上的指向稳定性分别为 $\theta_x = 5\ 87\ \mu$ $\theta_y = .$rad、. 6 92 μ rad。AR-HCF 输出端的稳定性显著提高，测得的数值为 $\theta_x = 0.89\ \mu$ rad、$\theta_y = 0.92\ \mu$rad [见图 5(e)]，，这凸显了该光纤波导在实现高稳定性光传输方面的一项关键优势。

输入和输出脉冲列的测量光谱如图 5(c) 和 5(f) 所示。每次测量中，我们采集了 600 组脉冲光谱记录，每组记录的积分时间为 1 s。从图 5(c) 和 5(f) 可以看出，输出脉冲列的光谱比输入脉冲列略微更嘈杂，我们认为这主要是因为在测量平均功率较低的输出脉冲列时，光纤光谱仪（HR2000+, Ocean Optics）的相对噪声水平较高。实验中，为避免可能损坏光谱仪，仅将少量超快脉冲耦合至光谱仪，导致测量的信噪比较低。

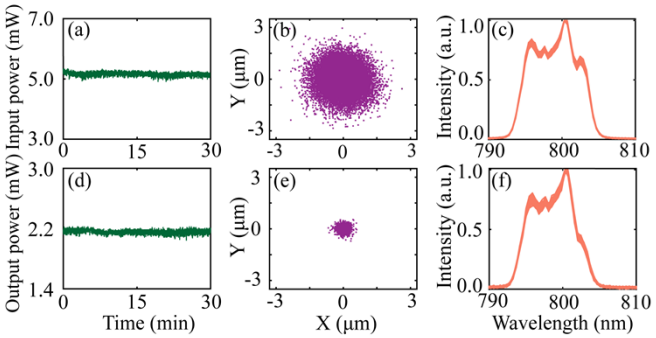

图 5. AR-HCF 输入端（a-c）和输出端（d-f）脉冲的功率稳定性、指向稳定性和光谱稳定性。（a、d）功率稳定性；（b、e）指向稳定性；（c、f）光谱稳定性。

为验证脉冲经反谐振空芯光纤传输的高稳定性，我们在实验中构建了超快脉冲传播的第二条自由空间路径。如图1所示，BS1反射出的能量占比为10%的光束经过两枚焦距分别为30 cm（L5）和10 cm（L6）的镀膜透镜进行光束整形，随后由一枚焦距为1 m的镀膜透镜耦合进入多程腔（MPC）。MPC由两面焦距为25 cm的凹面镜组成，镜面镀有反射系数高达98.5%的高反射膜。脉冲列在这段长0.8 m的MPC中往返5次，使有效传播距离达到~8 m。来自MPC的脉冲列经过一条光学延迟线（ODL），随后由一枚焦距为50 cm（L8）的镀膜透镜准直。第二条路径的总传播距离调整为~10 m，以与反谐振空芯光纤路径的传播距离相匹配。最终，两条路径输出的两束激光[Laser1和Laser2（图6(a)）] 被耦合进入平衡光学互相关模块 [12]，用于测量定时抖动。

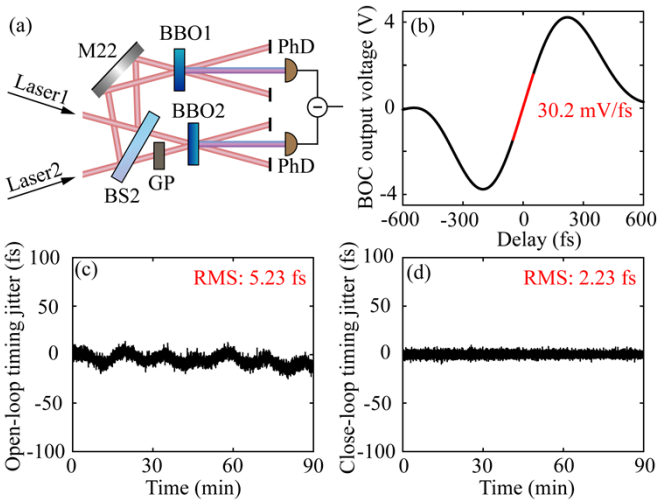

图 6. (a) BOC实验装置。BS2，分束器；M22，银镜；GP，玻璃片；BBO1-BBO2，β-硼酸钡；PhD，光电探测器。(b) BOC的光学互相关轨迹（黑色实线）。红色实线表示拟合斜率，为30.2 mV/fs。(c) 开环定时抖动。(d) 闭环定时抖动。

如图6(a)所示，并且[12], 如文中所述，基于和频产生的平衡光学互相关模块用于直接测量两个脉冲序列之间的定时抖动。在平衡光学互相关装置中使用一块厚度为200-μm的玻璃片（GP）和两块厚度均为2 mm的I类BBO晶体时，测得信号斜率为30.2 mV/fs，见图6(b)。将耦合进入平衡光学互相关模块的两个脉冲序列的平均功率均调至0.6 mW后，在开环条件下，90分钟的记录期间测得均方根定时抖动为5.23 fs[（见图6(c)），], 这对应于实验室环境中极低的相对光程变化 $<2\times10^{-7}$ 。这一相对光程变化比传统石英芯光纤中的变化低一个数量级以上[13,14]，这是由于反谐振空芯光纤中导引光学模式的光场与石英重叠极低[15]。在反谐振导引机制作用下，反谐振空芯光纤中传播的大部分光场被紧密限制在真空中，因此其中的光波对温度波动和光纤微弯曲不太敏感 [8]。采用基于光学延迟线装置的闭环控制，可轻松将均方根定时抖动抑制至2.23 fs，见图1和图6(d)。

总之，我们展示了通过长达 9.6 米的抽真空反谐振空芯光纤，灵活、稳定地传输 μJ 级、脉宽小于 200 fs 的钛蓝宝石激光脉冲。通过真空抽气，光纤非线性造成的影响得到了充分抑制，使脉冲光谱在传输过程中几乎保持恒定。由于波导色散，光纤输出端口处的脉冲宽度缩短了 ~15%，但这对后续主动脉冲同步实验的影响可以忽略不计。我们仔细测量了经反谐振空芯光纤传输后脉冲列的功率、指向和光谱稳定性，测得的性能极为出色：功率波动为 ~1%，指向稳定性为 <1 μrad，且光谱稳定性良好。光学互相关器测量结果表明，该反谐振空芯光纤脉冲传输系统的均方根定时抖动为 5.23 fs（开环）和 2.23 fs（闭环），彰显了其出色的抗环境扰动能力。

经费支持。张江实验室建设与运行项目（20DZ2210300）；国家自然科学基金委员会（52072277）；中国科学院基础研究青年科学家项目（YSBR-059）；上海市科技创新行动计划基础研究项目（20JC1416000）；国家博士后创新人才支持计划（BX2021328）；国家自然科学基金青年科学基金项目（62205353）；中国博士后科学基金会（2021M703325）。

参考文献

1. J. Kim, J. A. Cox, J. Chen, and F. X. Kärtner, “远程光学源与微波源的无漂移飞秒定时同步”，《自然·光子学》**2**(12), 733-736 (2008). 2. S. Schulz, I. Grguraš, C. Behrens, H. Bromberger, J. T. Costello, M. K. Czwalinna, M. Felber, M. C. Hoffmann, M. Ilchen, H. Y. Liu, T. Mazza, M. Meyer, S. Pfeiffer, P. Prędki, S. Schefer, C. Schmidt, U. Wegner, H. Schlarb, and A. L. Cavlieri, “X射线自由电子激光的飞秒全光同步”，《自然·通讯》 **6**(1), 5938 (2015). 3. M. C. Divall, P. Mutter, E. J. Divall, and C. P. Hauri, “用于自由电子激光泵浦-探测实验的TW级钛宝石激光系统的飞秒分辨率定时抖动校正”，《光学快报》 **23**(23), 29929-29939 (2015). 4. M. Xin, K. Şafak, M. Y. Peng, A. Kalaydzhyan, W.-T. Wang, O. D. Mücke, and F. X. Kärtner, “阿秒精度的多公里激光-微波网络”，《光：科学与应用》 **6**(1), e16187 (2017). 5. M. Xin, K. Şafak, and F. X. Kärtner, “大型科学仪器的超高精度定时与同步”，《光学》 **5**(12), 1564-1578 (2018). 6. Z. Y. Li, Y. X. Leng, and R. X. Li, “短脉冲拍瓦激光器的进一步发展：趋势、技术与瓶颈”，《激光与光子学评论》 **16**, 2100705 (2022). 7. M. Xin, K. Safak, M. Y. Peng, P. T. Callahan, and F. X. Kärtner, “通过3.5公里光纤链路实现单飞秒、长期稳定的远程激光同步”，《光学快报》 **22**(12), 14904-14912 (2014). 8. Z. T. Feng, G. Marra, X. Zhang, E. R. N. Fokoua, H. Sakr, J. R. Hayes, F. Poletti, D. J. Richardson, and R. Slavík, “空芯光纤实现的稳定光学频率梳分发”，《激光与光子学评论》 **16**(11), 2200167 (2022). 9. J. Kim, J. Chen, Z. Zhang, F. N. C. Wong, F. X. Kärtner, F. Loehl, and H. Schlarb, “使用单晶平衡互相关器实现长期飞秒定时链路稳定”，《光学快报》 **32**(9), 1044-1046 (2007). 10. A. Lekosiotis, F. Belli, C. Brahms, H. Sakr, I. A. Davidson, F. Poletti, and J. C. Travers, “通过一段10米长的嵌套式反谐振空芯光纤灵活地将压缩后的4 GW激光脉冲输送至靶上”，载于高强度激光与强场现象 (Optica出版集团), 论文 HTh5B.6 (2022). 11. A. Ortigosa-Blanch, J. C. Knight, and P. St. J. Russell, “光子晶体光纤中200 fs泵浦脉冲引发的脉冲破裂与超连续谱产生”，《美国光学学会杂志B辑》 **19**(11), 2567-2572 (2002). 12. K. Y. Liu, H. Y. Li, X. L. Wang, Y. Q. Liu, L. W. Song, and Y. X. Leng, “飞秒再生放大器的定时波动校正”，《晶体》**11**(10), 1242 (2021). 13. V. Dangui, H. K. Kim, M. J. F. Digonnet, and G. S. Kino, “导气型光子带隙光纤中基模的相位温度灵敏度”，《光学快报》 **13**(18), 6669-6684 (2005). 14. B. Shi, G. Marra, Z. T. Feng, H. Sakr, J. R. Hayes, E. R. N. Fokoua, M. Ding, F. Poletti, D. J. Richardson, and R. Slavík, “室温运行的温度不敏感延迟线光纤干涉仪”，《光波技术杂志》 **40**(16), 5716-5721 (2022). 15. C. Markos, J. C. Travers, A. Abdolvand, B. J. Eggleton, and O. Bang, “混合光子晶体光纤”，《现代物理评论》 **89**(4), 045003 (2017).