

空芯光纤——完美的光波导

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/33462.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

空芯光纤——完美的光波导。菲利普·罗素（Philip Russell）是世界公认的光子晶体光纤之父，也是空芯光纤的创始人，历任英国皇家学会会士、德国马普光学所创所所长以及美国光学学会主席，现为中国科学院外籍院士、罗素先进光波科学中心（RCALS）主任。Philip Russell基于空芯光纤在光通信及高功率紫外光刻光源的应用曾创建过两家高科技初创公司（Blaze Photonics和Ultraluma，后分别被NKT Photonics和全球光刻机巨头ASML收购）。近年来，空芯光纤在下一代光纤通信与超快激光等领域展现出巨大优势与应用潜力，引起了世界范围内研究热潮，相关应用技术开发呈现爆发式增长（例如去年底微软公布了将在两年内部署1.5万公里空芯光纤的重大部署）。据此，eLight邀请空芯光纤创始人Philip Russell院士撰写空芯光纤评述，回顾空芯光纤的发明历程，并揭示其关键原理与技术难点。

使用空芯波导替代自由空间来传输电磁辐射的理念由来已久。自20世纪40年代起，横截面尺寸仅支持基模的空芯金属波导就已广泛应用于包括雷达装置在内的各种微波电路中。许多早期研究激光的科学家与工程师都具备微波技术背景，这对光通信的早期发展产生了深远影响。不过，由于金属波导在光频段的损耗极高，在20世纪60年代激光出现后，研究人员开始尝试在地下管道中安装透镜组以构建自由空间光链路。虽然这种方法能够克服光束衍射问题，但人们很快发现，由路面交通振动等因素引发的光束指向误差会随着距离迅速累积，致使此类系统无法满足远程通信的需求[1]。与此同时，玻璃毛细管也曾被短暂研究过，然而由于其泄漏损耗过高（与 $2d^{-3}m^{-1}$ 成正比，其中 λ 为真空中的波长， d 为孔径），因而被认为不适用于通信[2]。不过，在20世纪90年代初，孔径大（ $d/\lambda \sim 300$ ）、长度短（数米）的充气毛细管曾被用于拓宽超短钛宝石脉冲（ <0.1 ps， ~ 10 mJ）的频谱，脉冲经压缩后宽度可接近单周期[3]。此后，基于毛细管的脉冲压缩技术成为超快与阿秒科学领域的核心技术[4,5]。

1978年的一项理论研究提出了一种布拉格光纤结构，如图1a所示，它由环绕中心空芯的多层同心环构成，通过布拉格反射来实现对光的束缚[6]。虽然在可见光与近红外波段实现这一想法后来被证明难以做到（后文将讨论单环空芯光子晶体光纤的类似问题），但麻省理工学院的团队通过在多层同心环中交替使用聚合物和硫系玻璃材料并拉制成光纤，成功制备出适用于 $10\ \mu\text{m}$ 波段的空芯布拉格光纤[7]。这种光纤损耗约为1 dB/m，足以灵活传输 $10\ \mu\text{m}$ 的CO₂激光，并且目前已被应用于激光手术。

1991年5月，在美国巴尔的摩的激光与电光会议（CLEO）会议上，我受到了一个观点的启发——即除了所有周期性材料中都具有的众所周知的电磁波阻带外，在一些具有恰当结构的材料中也可能形成完全的三维光子带隙（PBG）[8]——提出了开发一种空芯光纤的构想：其包层采用周期性结构设计以支持二维光子带隙，从而实现对光场的约束[9,10]。在光纤轴周围特定范围的锥角内，无论以何种偏振态或方位角入射的光线都将被完全反射回纤芯，并在一系列满足纤芯谐振条件

的反射角度上形成本征模式。这种空芯波导的低损耗导光特性首次打破了已有百年历史的瑞利判据（Rayleigh criterion）[11]。瑞利准则限制了光束在真空环境中保持聚焦的传输距离，一旦超过这个距离，衍射效应就会导致光束发散。

这一新型导光机制的独特之处在于其低损耗传输并不依赖全内反射（TIR）——毕竟在空芯结构中，全内反射根本就不可能存在（若要满足TIR条件，模场折射率需小于1）。理想的空芯光纤结构应包含周期性排列的空芯微通道阵列，结构中心为一个空芯，且整个结构沿光纤传输方向贯穿。回溯到20世纪90年代初，为了避免被冠以又一个疯狂的点子，我特意将其命名为多孔光纤（holey fibre），并指出第一个单词中有一个e。要实现一个有效的多孔光纤原型，不仅要开发新型光纤拉制技术，还需要设计一种新的求解麦克斯韦方程组的数值算法[9]。在1991-1995年之间的四年时间里，我的团队（当时在南安普顿大学，1996年后转至巴斯大学）致力于研发适用的制备工艺，最终确立了如今全球通用的堆栈-拉丝（stack and draw）技术。在研究初期，团队因在空芯环绕的实芯结构中发现改进的全内反射现象而有所分心；这一发现直接催生了首个覆盖倍频程的飞秒频率梳，也为特奥多尔·亨施（Theodore Hänsch）和约翰·霍尔（Jan Hall）赢得了2005年的诺贝尔奖[12]。在这个意外收获之后，首根空芯光子晶体光纤（HC-PCF）于1998年在巴斯大学的拉丝塔中诞生。其透射光谱呈现窄带高透与宽带高损交替出现的特征，这与光子带隙导光理论的预期完全吻合（见图1b、c）[13]。

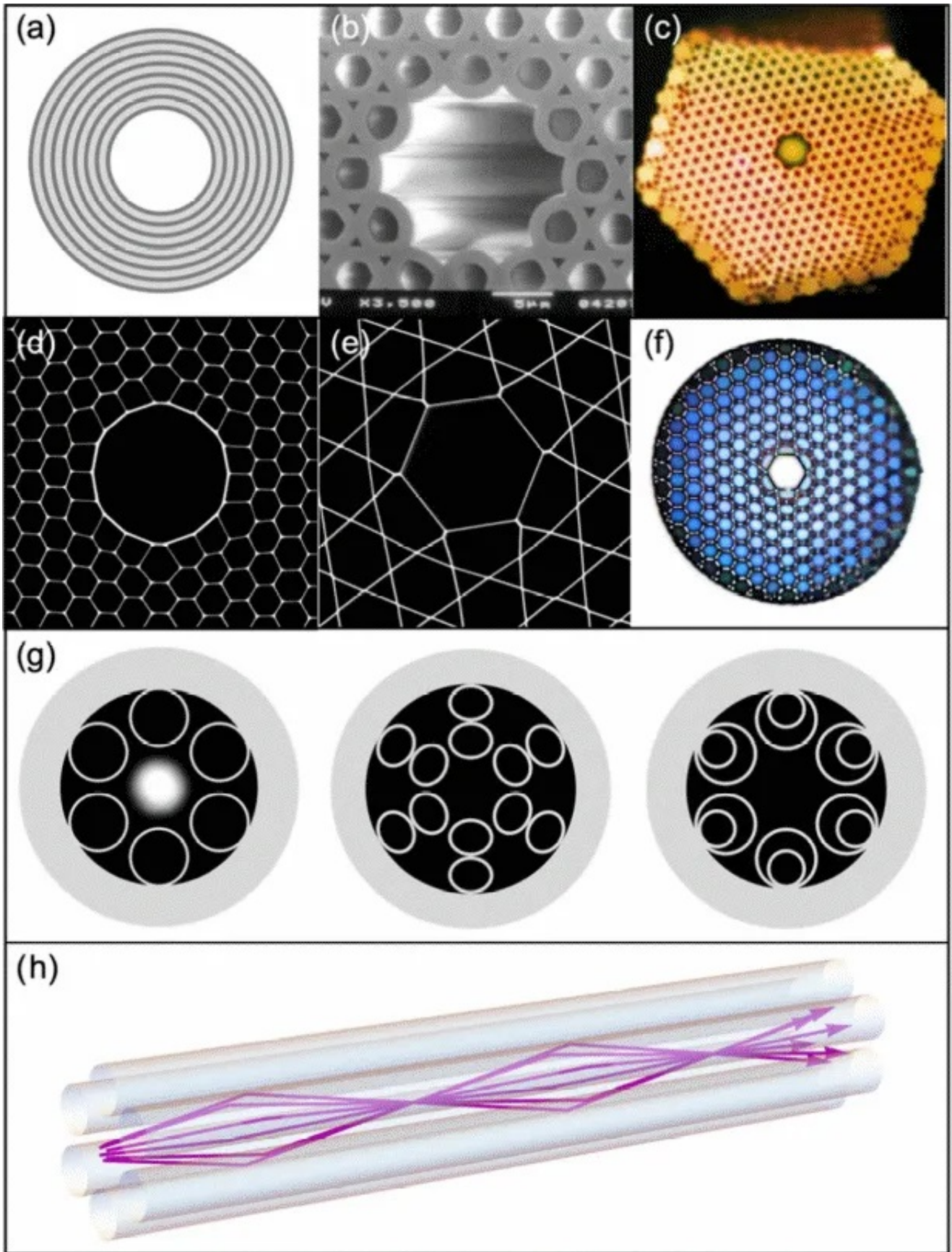


图1：空芯光子晶体光纤结构。(a)空芯布拉格光纤结构示意图。对于纯石英包层结构，光栅周期 ~ 0.47 μm 。(b)首个空芯光子带隙光纤的扫描电镜图，纤芯直径为 $14 \mu\text{m}$ [13]。(c)受到白光激发时，

图(b)中光子带隙光纤的导模光斑，展示其光谱滤波特性。(d)经优化设计的光子带隙空芯光子晶体光纤扫描电镜图[14]。(e)采用Kagomé结构包层的空芯光子晶体光纤扫描电镜图[15]。(f)实现白光波导的Kagomé结构空芯光子晶体光纤。(g)具有六重旋转对称性的三种单环空芯光子晶体光纤结构示意图：左图为非接触毛细管环形阵列[16]，中图为堆叠毛细管结构[17]，右图为嵌套毛细管构型[18]。引入复杂的径向结构可增强径向阻带效应，显著降低泄漏损耗和弯曲损耗。(h)光线在单环光子晶体光纤纤芯内受到径向阻带反射形成的锥形光束。当满足掠入射条件时，其反射率趋近100%。当满足横向谐振条件时，纤芯内将形成稳定的模式。

从当下的观点看来，HC-

PCF的确具有很多值得深入发掘优势，因为它占据了参数空间中被工程师视作甜蜜点（sweet spot）的一块儿区域。其一，由于纤芯中的大部分光在气体或真空中传播，这就显著降低了与玻璃相关的吸收以及瑞利散射（瑞利散射与 $1/\lambda^4$ 成正比）。并且，通过调整玻璃微结构的厚度和形状，使其与纤芯模式形成反谐振，能够使得光在玻璃中的占比最小化。其二，对于纤芯直径 d_c 远大于波长（典型值 $d_c/\lambda \approx 40$ ）的HC-PCF而言，构成导模的光线以掠入射角入射到纤芯边界，产生接近100%的菲涅耳反射，进而使得任何能够束缚光场的机制在束缚强度上大为提升。

要理解空芯光纤纤芯对光的束缚机制，需从电磁波阻带这一物理概念入手——这一概念已被研究了超过一百年，并解释了诸多现象，比如晶体中的X射线布拉格散射、蛋白石的变彩效应，以及蝴蝶翅膀和甲虫外壳的虹彩色。实际上，阻带是周期在波长尺度的周期性结构所具有的普遍特征。在由两种不同折射率的材料交叠组成的周期性结构中，当折射率差 Δn 远小于平均折射率 n 时，布拉格条件具有明确的界定。但随着 Δn 趋近于 n ，这一条件的界定会变得越来越模糊——此时，在固定光频率的情况下，满足布拉格反射条件的入射角范围会逐渐增大；在固定入射角的情况下，满足布拉格反射条件的光频率范围会逐渐展宽。在满足布拉格反射条件时，光无法在多层周期结构中传播（尽管层数较少时可发生隧穿效应），因而会被强烈反射。

相比于电磁波阻带，光子带隙的研究历史则短得多。Eli Yablonovitch在1980年代末提出可通过构建类比于电子带隙的电磁波带隙来抑制自发辐射，即在特定频率范围内，光无法在具有电磁带隙的三维空间内传播[8]。不久后人们发现，当周期性结构折射率比值大于~2.2:1时，二维“光子晶体”在面内可形成光子带隙效应。当我提出基于二氧化硅-空气的光子晶体光纤结构（折射率比值1.45:1）可形成面外（out-of-plane）光子带隙效应时，许多人认为这不可行。事实证明他们错了一——正如前文所述，当光线掠入射时，菲涅耳反射系数会变得很大，这使得光子带隙更容易形成。在这一情况下，空气中的横向有效波长（

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda / \sqrt{1 - n_m^2} \gg \lambda$$

， n_m 是模式因子）与纤芯直径相当。

要形成一个完整的二维光子带隙结构，所有方向、所有偏振态的光都应该无法在这一结构中传播（图1d）展示了BlazePhotonics公司在2000年代初开发的结构经优化过的光子带隙空芯光子晶体光纤[14]）。但对于空芯光子晶体光纤中的基模来说，只需要抑制包层中在特定锥角范围内光的传播即可。这可通过径向阻带的形成来实现，径向阻带的形成就像围绕纤芯放置了一个柱面“镜子”。当单周期结构的传输矩阵的两个特征值（ $e^{\pm i q}$ ， q 为正数）为实数时，阻带就可以形成。在具有 N 个周期的结构中，光场振幅将以系数 $e^{\pm N q}$ 倍数衰减。当入射角接近掠入射时， q 的值将远大于1，因而单周期结构也可以实现很高的反射系数，而此时反射谱带宽（随 N 增大而变窄）会变得非常宽。

在首篇有关光子带隙空芯光纤论文发表后[13]，研究人员意外地发现，具有Kagomé晶格结构（

图1e – f) 包层的空芯光纤也可以用来传导白光，其传输损耗为0.1dB/m [15]。由于数值模拟未显示有光子晶体带隙的存在，起初该种空芯光纤的传光机制并不明确。但人们推测第一层空心管环的设计可能很关键。2008年，莫斯科的一个研究组报道了一种在空芯结构光纤，这种结构在其空芯管内壁粘连了一圈毛细管。研究组在实验上测得了这种光纤结构的多个导光光谱带（部分导光光谱带损耗低于1dB/m），证实了这种大为简化的结构也能用于光传输[16]。这项工作开启了单层管环空芯光子晶体光纤（single-ring HC-PCF）的研究热潮（图1g）。在最近的一个报道中，该种空芯光纤的损耗被优化至低于现在普遍使用的石英通信光纤[17-21]。需要指出的是，空芯光纤损耗的优化需要大量的数值模拟工作，试错过程以及新型的制备技术。

在单管环空芯光子晶体光纤中，对于模式因子 nm 接近1的模式来说，除了在一些波长处存在较窄的“光子允带窗口”（photonic band windows）外，光纤对以光纤轴为中心的锥形光束在所有方向上均存在强烈反射（图1h）。在这些光子允带内，传输矩阵的特征值为 $e \pm iq$ ，允带的光可在包层传播，从而导致了具有很大传输损耗的光谱窄带窗口。这些高损耗光谱窄带在文献中通常被归因于纤芯和管环壁的“谐振（resonance）”或“反交叉（anti-crossings）”。在远离这些高损耗光谱窄带的光谱区域，光纤的导光机制是“反谐振反射”，其本质上是单周期结构形成了光子阻带。单环空芯光子晶体光纤与1978年提出的布拉格光纤具有一些相似性[6]，但单管环空芯光子晶体光纤的管环之间具有空隙，这导致了可能的漏光现象。不过在掠入射时，管环的管壁反射系数非常高，相当于镜面反射，而且管环间的间隙远小于横向有效波长，这使得光可被强烈反射回纤芯内。

在应用于通信领域时，空芯光纤的损耗需要非常低。但在应用于其他领域时，低损耗特性并不是最重要的。在具有0.1dB/m损耗的空芯光子晶体光纤里，光束可在纤芯中保持高光强密度的同时，实现30米的传输距离而光强仅衰减一半，这极大的增强了光与气体的相互作用强度和距离[15, 20]。由于空芯光子晶体光纤的色散性质可由所填充气体的压力来调控，气体填充的空芯光子晶体光纤对气体非线性光学的发展起到了革命性的作用。利用该种光纤，脉冲宽度30 fs脉冲能量数 μ J的脉冲可实现极限压缩，并产生真空紫外波段的色散波[23]。由于所需要的脉冲能量比普通宽孔毛细管低三个数量级，因而脉冲重复频率可提升至MHz量级而不用增加平均功率。高重复频率是很多实验中追求的参数。由掺镱光纤激光器产生的脉冲重复频率为10 MHz，波长1030 nm，脉冲能量7 μ J，脉冲宽度320fs的激光脉冲可以在一个两级空芯光子晶体光纤的压缩装置中以60%的效率将激光脉冲压缩至单周期[24]。而且整套系统可集成为较为紧凑的一套设备。在近期的一个报道中，利用氢气填充的空芯光子晶体光纤，通过控制填充气体的压力来调节色散，R. Tyumenev等人利用拉曼效应实现了高保真量子状态的单光子频率上转换[25]。螺旋空芯光子晶体光纤具有对圆偏振的保偏特性，该种光纤在特定结构下也可呈现圆偏振二向色性[26]。液态填充的空芯光子晶体光纤可用于高灵敏度光化学反应的监测[27, 28]。空芯光子晶体光纤也可用于光镊领域，实现对粒子在弯曲路径上的长距离捕获与推进[29]。此外，空芯光子晶体光纤可实现对中红外和紫外光的高质量灵活传输，这使得空芯光子晶体光纤可应用在医疗、光谱、遥感等领域[30, 31]。

以上只是空芯光子晶体光纤众多具有颠覆性应用的新兴应用领域中的几个例子。对空芯光子晶体光纤最令人瞩目的研究是其传输损耗的降低，如果可以使传输损耗显著低于传统通信光纤，这可能彻底改变未来的光通信系统。2000年代初，位于英国巴斯市的初创公司BlazePhotonics首次尝试开发低损耗空芯光子晶体光纤用于通信[14]。在1550nm处实现了低于1dB/km的损耗，但2004年该公司因缺少资金而破产[32]。二十年后，电信行业终于重新跟进该技术，并成立了Lumenicity公司，该公司在2022年被微软收购[33]。最新的单管环空芯光子晶体光纤研究大幅降低了瑞利散射所造成的损耗。这使得近红外光可在该光纤中实现长距传输，从而避免使用昂贵的掺铒放大器作为中继器。未来空芯光子晶体光纤的损耗很有可能远低于传统光纤，从而大量减少中继放大器的需求，而降低长途通信成本。（来源：中国光学微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1186/s43593-025-00086-w>

作者：Philip Russell 来源：eLight

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发