

用“面包圈”形激光做空气波导

(北京大学 王树峰 编译自 Cheng Ya. *Physics*, January 23, 2023)

利用激光在空气中制造出的波导可以使光传输近 50 m。

光纤和平面波导等传统的光波导由中央芯体和环绕周围的低折射率包层组成。光在纤芯—包层边界处发生全内反射，从而被有效地限制在纤芯中。尽管光纤可以让光传输超过 100 km，但无法应用于高功率传输和大气监测等。这需要光束在大气中传输，并克服衍射导致的光束发散，以窄光束长程传播。一个可能的解决方法是用激光脉冲在空气中“塑造”出波导，即以未受扰动空气为中心核，并在周围产生低密度包层。马里兰大学帕克分校的 Andrew Goffin 等人使用的新方法是用“面包圈”形光束在空气中制造一个 45 m 长的波导，这是他们之前纪录的 60 倍。

要实现空气波导，需要用“面包圈”形飞秒激光脉冲加热空气成分(例如 N_2 、 O_2 和惰性气体)使之膨胀，导致密度低于周围的空气，使纤芯和包层之间具有折射率差。随后的“探测”脉冲就可以通过该

空气光纤传输。

那为什么“面包圈”脉冲不会发散？答案在于一个称为成丝化的非线性过程：脉冲在空气中传播时，克尔非线性会引起自聚焦效应，而高度自聚焦产生的等离子体又会引发散焦效应，这两种效应彼此竞争且达到平衡，导致了成丝化。成丝化可以使激光场在长距离内保持窄光束。然而，激光成丝的宽度不超过 200 μm ，峰值强度不超过 10^{14} W/cm^2 ，这限制了成丝纤芯的平均功率。因此，飞秒激光脉冲产生的成丝本身并不是高功率激光传输的有效途径。但当用于产生空气波导时，成丝可以为高功率光束创造一条路径。

Goffin 等人于 2014 年首次展示了空气波导原理。他们将红色激光束通过四段掩模，以方形图案创建四个激光成丝。这些成丝形成了一个“光篱笆”，将光线限制在其核心内。这种空气波导在约 70 m 长的空气中传输了 110 mJ 的绿光脉冲。

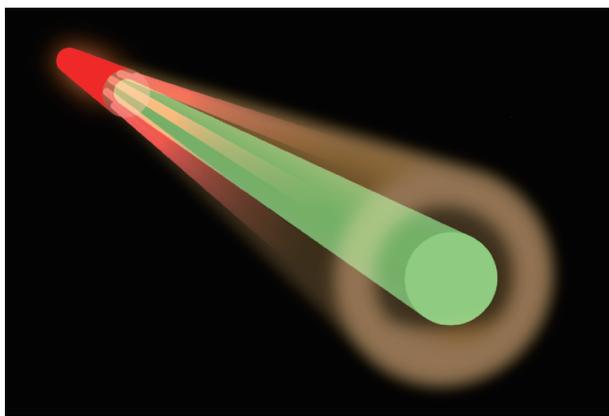
由于光篱笆中的成丝数量较少，使得波导的宽度以及纤芯和包层之间的密度差异有限。为了增加成丝的数量，这次他们使用“面包圈”形光束(平滑的拉盖尔—

高斯 LG01 模式)，将激光集中到直径为几毫米的环中。光在“面包圈”周围以随机但均匀分布的方式成丝，产生的包层覆盖在整个波导周围。

在实验室旁边的走廊上，他们演示了 45 m 长的空气波导。波导发生器是 300 fs 的激光脉冲，波长为 800 nm，总能量为 120 mJ。该脉冲的“面包圈”模式在直径为 5.6 mm 的环周围形成大约 30 根成丝。通过此波导，研究人员传输了一束波长为 532 nm，能量为 1 mJ 的 7 ns 探测脉冲。检测器显示使用波导传输的能量比没有使用时高出约 20%。此空气波导的寿命长达几十毫秒。

这种波导方案也有一些缺点，例如相对较高的传播损耗、被传输光束的模式分布不佳，以及空气波导形成过程中的高能量消耗。提高性能需要开发更复杂的光塑形技术。如果最初的“面包圈”光束可以更均匀，那么多条成丝应该会以更确定的方式形成，这会使空气波导更稳定且易于重现。

关于未来，他们设想空气波导可以在一公里或更远的距离内传输高功率光。他们估计公里级传输将需要高能(高达 2 J)的 LG01 脉冲来支持约 40—80 根成丝的环形覆盖。这种空气波导可以有許多实际应用，例如传输紫外光、检测大气污染、检测放射性物质，以及通过生成等离子通道引雷等。



研究人员使用具有“面包圈”形状的激光脉冲创建空气波导。脉冲最初形成细丝(红色)，加热空气并最终形成低密度包层(橙色)，第二个激光脉冲通过这个波导传输(绿色)