空心矩形波导过渡段—加载波导，用于实现基于电磁射流的测量装置

A. DEUBAIBE[1,2], S. NDOUWE[1], B. MAHAMOUT MAHAMAT[1], D. DARI YAYA[1] 和 B. SAUVIAC [3]

[1] 乍得阿贝歇国立高等科学技术学院[2] 乍得恩贾梅纳大学[3] 让·莫内大学 圣艾蒂安，法国国家科学研究中心，光学研究生院，*HubertCurien*实验室 *UMR5516*，*F*-42023，法国圣艾蒂安antonydeb1982@gmail.com

摘要 — 文献中曾使用球体、圆柱体、圆锥体和长方体，在平面波照射时于这些**结构后方产生光子**射流。我们致力于将这一概念推广至微波频段的波导结构中（我们称之为电磁射流）。**电磁射流可在填充介质的矩形波导输出端产生。为将电磁**射流用作局部测量工具，**因此有必要研究空心矩形波导与填充波导之间的匹配。本文对这一问题进行了探讨，并比较了两种解决方案。**

I. 引言

2004年，Chen等人[1] 展示了产生一种弱发散近场聚焦的可能性，其特征是半高全宽小于波长。在这些研究之后，文献中使用了球体、圆柱体、圆锥体和长方体，当这些“粒子”受到平面波照射时，可在其后方产生光子喷流。通过超越衍射极限，这一最初被称为光子喷流的现象提供了大量机遇。

将该原理推广到其他频率范围 [2], , 以“电磁射流”命名，并借助导波结构 [3] 产生这一现象，可以设想出用于无损检测的测量装置。正是基于这一思路，我们设想借助矩形波导来揭示这一现象。

所研究的结构是一个填充特氟龙、由 5 GHz 下的高阶模式 TE01 激励的多模矩形波导。要构建完整的实验装置，必须使用传统的空心波导来激励该结构。因此，必须实现空心矩形波导与特氟龙填充矩形波导之间的匹配。多年来，关于不同类型电磁波导之间匹配的研究已有很多。这一主题至今仍备受关注 [4], , 无论是耦合不同类型的结构，还是连接尺寸不同 [5], 、形状不同 [6]或介电常数不同[7]的波导。就我们的情况而言，需要连接两个填充了不同介电常数材料的 WR430矩形波导。本文将介绍两种实现匹配的方法。

II. 电磁喷流

图1展示了用于产生电磁射流的结构。根据端头的形状，可以调节在空气中产生的电磁射流的特性。

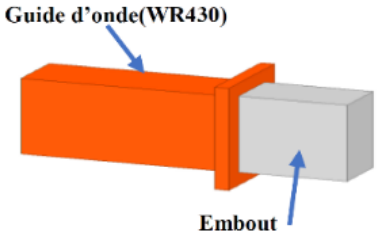


图1：填充特氟龙的波导

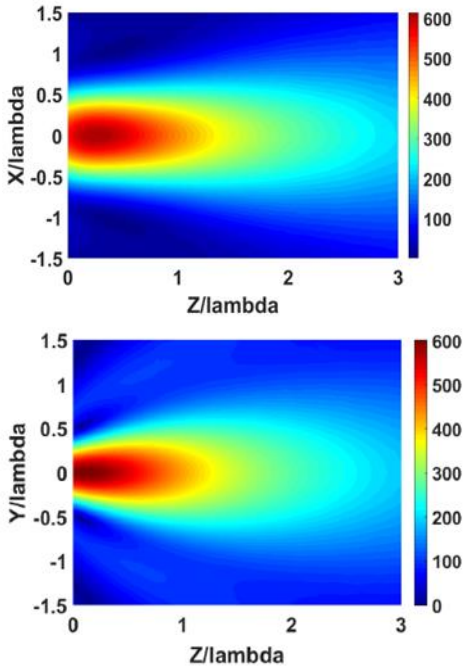


图2：结构输出端电场的聚焦情况，随端头距离（沿 Z方向）以及沿矩形波导短边（y 轴）和长边（x 轴）的变化 [8]。

当波导以正确的模式激励，并配备合适的端头且处于适当的频率时，可以将电磁能量聚焦在出口附近的近场区（图2）。此时可观察到一种局部稳定传播现象，其范围为几个波长。

为了实现一个易于操作的实验装置，我们希望能够使用完全标准的波导元件（同轴波导至空心矩形波导过渡段、空心矩形波导段、可填充介质且其一部分将从结构中伸出的矩形波导段——图 1）。只有端头的形状和尺寸需要能够控制并产生电磁射流。因此，接下来我们将研究该装置与空心矩形波导的耦合。

III. WR430波导与仿真

我们研究所使用的矩形波导为 WR430 型。由于它是标准波导，其尺寸为 a= 54.61mm、b=109.22mm。研究频率设定为5GHz。需要指出的是，在该频率下，波导中的传播可能是多模式的：空波导中有 10 种可能的模式，而在尺寸相同的填充聚四氟乙烯的波导中则有 21 种。前三种模式（TE10、TE20和TE01）在空波导中的截止频率分别为1.39GHz 和 2.738GHz，在填充聚四氟乙烯的波导中分别为 0.916GHz和 1.872GHz，其中 TE20 和 TE01 模式具有简并的截止频率。

电磁问题将借助有限元法进行处理。在仿真中，加载波导中使用的特氟龙将以相对介电常数2.1进行表征。

IV. WR430矩形波导中的过渡段

为解决两个波导之间的匹配问题，我们提出两种过渡段，插入空波导与填充聚四氟乙烯的波导之间。无论采用哪种方案，目的都是使两个矩形波导之间的折射率逐步变化。

第一个版本是金字塔形匹配结构（图3）。该结构是在空波导与加载波导之间放置一段长度为100毫米、矩形底面的特氟龙金字塔。

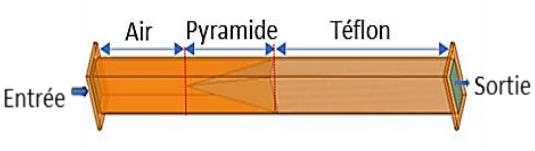


图3：两个WR430矩形波导（真空-特氟龙）之间的金字塔形过渡段：三维示意图。

第二种方案如图4所示。在两个波导之间加入一个特氟龙缺口（形状像衣夹）。介质均匀填充波导的窄边，而在宽边则可以观察到特氟龙逐渐填充的情况。缺口尖端位于波导宽边的中心，长度为120毫米

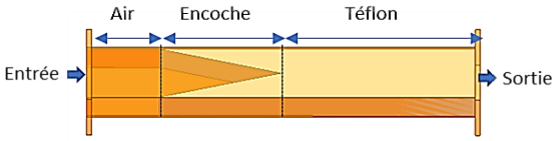
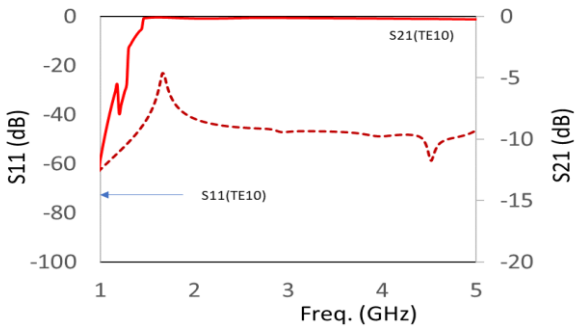


图4：两个矩形波导 WR430（空腔-特氟龙）之间的凹槽过渡段：3D 示意图。

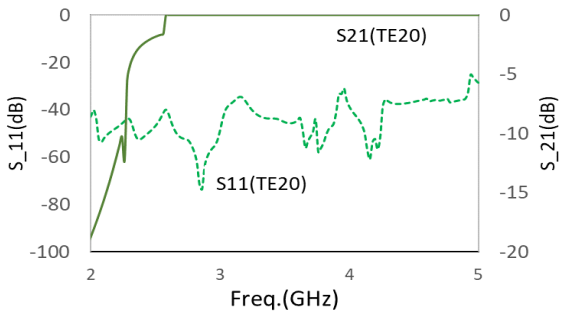
V. 结果与讨论

A. 金字塔形过渡

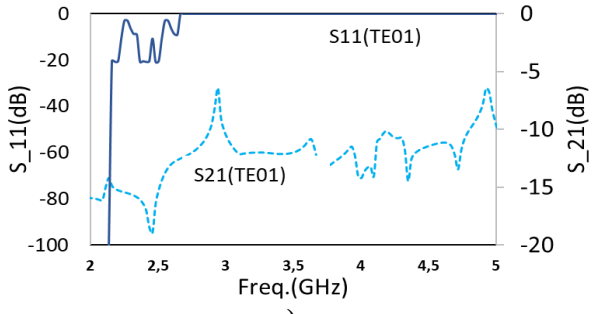
图3所示结构经过优化，以获得最小失配损耗。金字塔长100毫米。图5a、5b和5c给出了前三种模式的 S 参数结果。



a)



b)



c)

图5：TE10 模式（a）、TE20（b）和 TE01（c）下金字塔形过渡的响应。

我们观察到首先从这三幅图中可以看出，波分别在1.39GHz、2.78GHz和2.78GHz的频率下开始传播，这些频率分别对应 TE10、TE20和TE01模式的截止频率。

这三幅图表明，在每种情况下，波的传播损耗都很小，且 5 GHz 时的反射低于 -20 dB。还可以看出，TE01 模式的反射极低（<-50 dB）。

B. 过渡段 呈槽口形

同样，已对凹口形过渡结构进行了尺寸优化。选定的凹口长度为150mm。图6a、6b和6c分别给出了由TE10、TE20和TE01模式激励的结构的S 参数。

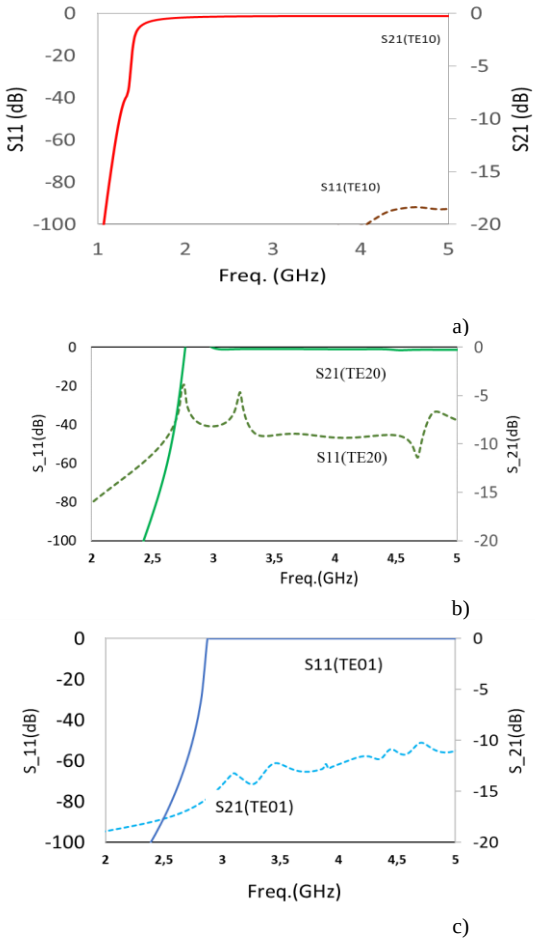


图6：采用凹口形过渡结构的结构对于 TE10 模式(a)、TE20 模式(b)和 TE01 模式(c)的 S 参数。

与前一种情况一样，我们可以观察到低频下截止频率的影响。对于这一结构，匹配似乎更好。3 种模式在 5 GHz 时的反射水平都低于 -50 dB。TE10 模式的反射水平最佳，在整个频段内反射均低于 -90 dB。

可以看到，凹口形过渡结构对基模的匹配略好，而金字塔形过渡结构对 3ème 模式的匹配明显更好。总的来说，结论是：通过适当优化匹配区的长度，电磁波传播时的损耗可降至最低，在 5 GHz 时反射低于 -40 dB，插入损耗低于 0.25 dB。因此，两种方案都可行，但从工艺实现角度来看，金字塔形结构似乎最为简单。

VI. 过渡段后电场的分布

为了验证过渡段在输出端确实保持模式，我们展示了填充聚四氟乙烯的波导输出端TE10、TE20和TE01模式的电场分布图。对于金字塔形过渡，结果如图7所示。

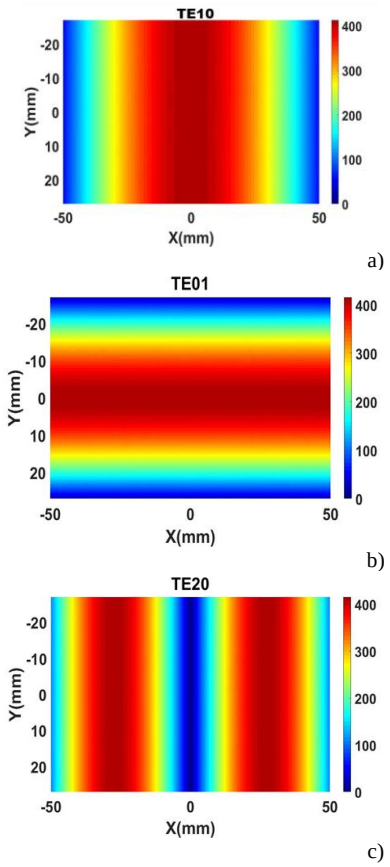


图7：负载矩形波导中(a)TE10、(b) TE01 和 (c) TE20 模式的电场分布图。金字塔情况。

如图7所示，加载波导横截面上的电场分布得到了完全保留，这充分验证了匹配方法。

VII. 完整结构的响应

现在，我们对整个结构进行了仿真，并观察了结构出口处产生的射流（图8）。我们比较了以下情况下由TE01 模式在出口处产生的电磁射流：

- 从源（8a）开始的填充聚四氟乙烯的波导- 不带过渡段的空波导—填充波导接头（8b）- 带金字塔形匹配段的接头（8c）- 槽形匹配段（8d）

可以看出，在不同的配置中，端头尺寸设计合理，因为它能够在结构外部生成形状良好的射流。获得的各个射流形态基本相同，因为它们由空间分布相同的模式在波导内部激发。尽管如此，仍可注意到，与理想情况（8a）相比，射流沿 z 方向的长度有所缩短。其次，最显著的差异在于射流中的场幅度。在单个加载波导的情况下（8a），射流焦点处的场强约为 800 V/m。若没有匹配系统（6b），场强则减半。最后，在我们的两种过渡段情况下（8c）和（8d），观测到的场强约为 770 V/m。

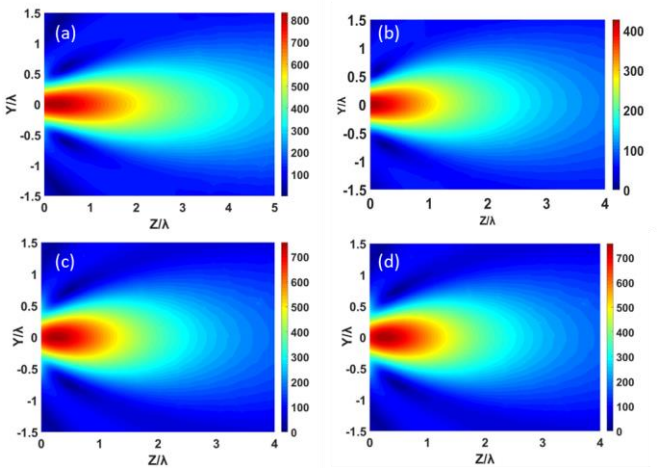


图 8. 端头出口处电磁射流的电场分布图（TE01模式，5GHz）。（a）从源开始的填充聚四氟乙烯的波导（b）由无过渡段的空波导激励的填充聚四氟乙烯的波导（c）由带金字塔形过渡的空波导激励的填充聚四氟乙烯的波导 （c）由带缺口型过渡的空波导激励的填充聚四氟乙烯的波导。

VIII. 传播模式选择

为了生成在 x 轴或 y轴上均匀集中的电磁射流，我们自然地将选择倾向于TE10 模式或TE01 模式，因为波导中的场分布必然会影响电磁射流在出口处的形状。例如，我们注意到，目前尺寸设计的端头由 TE20 模式激励时，会产生双射流，如图9所示。不过可以看出，与图8的情况相比，射流焦点处的强度明显较低。

合理选择激励模式，就能在出射射流的形状和分布方面获得很大的灵活性。

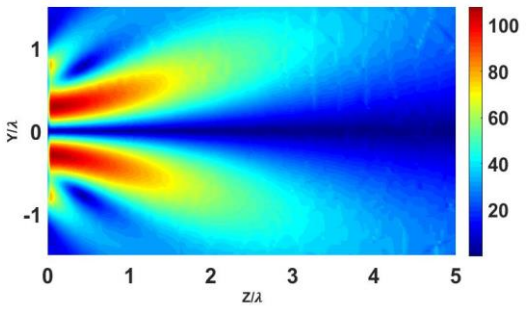


图 9. 端头出口处电磁射流的电场分布图（TE20 模式，5 GHz）。

IX. 结论

我们的目标是提出一种基于标准矩形波导的简单结构，用于在输出端生成电磁射流。我们证明，可以采用简单的形状，在两个波导之间通过逐步改变介质折射率，实现良好的匹配。这样便可以在该结构的输出端生成电磁射流。改变端头的几何形状可以改变输出射流的形状；我们也证明，还可以通过选择结构的激励模式来实现调控。因此，接下来需要设计一个高效的模式选择器。

X. 参考文献

[1] Z.Chen 等，《光子纳米射流增强纳米粒子的光后向散射：一种潜在的新型可见光超显微技术》，《Opt. Express》，第12卷，第7期，第1214–1220页，2004年4月。[2] B. Ounnas、B. Sauviac、Y. Takakura、S. Lecler、B. Bayard、S. Robert，《尖端波导产生的单光子射流和双光子射流及其对应的后向散射增强：微波频率下的直接观测》，《IEEE 天线与传播汇刊》，第63卷，第12期，第5612–5618页，2015年12月。[3] H. Hyani，《三维电磁射流：不透明结构中的检测、成像与无损检测》，博士论文，里昂，2021年。[4] Y. Zhao、J. Dong、F. Yin、X. Fang、K. Xiao，《宽带共面波导至充气矩形波导的过渡段》，《Electronics》，2022年。[5] P.-H. Tichit、S. N. Burokur、A. de Lustrac，《基于空间变换的波导适配器》，第17届全国微波会议，2011年5月—布雷斯特。[6] Holzman, E. L，《一种简单的圆形至矩形波导过渡段》，《IEEE 微波与无线元件快报》，15(1)，25–26。doi:10.1109/lmwc.2004.84096[7] C. P. Scarborough、Q. Wu、D. H. Werner、E. Lier、B. G. Martin 和 R. K. Shaw，《方形双极化超喇叭设计》，IEEE 国际天线与传播研讨会（APSURSI），2011年，第1065–1068页，doi: 10.1109/APS.2011.5996464。[8] S. Ndouwe，《矩形波导出口处光子射流的优化》，阿贝歇国家高等科学与技术学院硕士论文，乍得，2022年。