金刚石晶格结构启迪的轻量化全极化龙勃透镜天线

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/43025.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！

金刚石晶格结构启迪的轻量化全极化龙勃透镜天线。东南大学洪伟教授团队联合香港城市大学、紫金山实验室等研究人员在中国工程院院刊Engineering发表了题目为A Diamond-Lattice-Structure-Inspired Full-Polarized Lightweight Steady Isotropic Luneburg Lens的研究论文。文章首次提出一种以金刚石晶格结构为灵感的轻量化、全极化龙勃透镜（Luneburg lens, LL）天线，在保留全尺寸龙勃透镜笔状波束、高增益、宽带宽、全向扫描等核心优势的同时，利用金刚石晶体结构的各向同性，使透镜可无缝适配任意极化状态与宽范围入射角，并借助三维打印（3D Printing）技术实现了复杂结构的高精度制造，为卫星通信、通感一体化、微波成像等前沿应用指明了新路径。

龙勃透镜的价值与瓶颈：为何要轻下来

多波束天线是无线通信、雷达、微波成像等领域不可或缺的器件，需同时具备高增益、良好隔离、低副瓣、宽带宽与多极化能力。作为一种基于几何光学的梯度折射率（GRIN）透镜，龙勃透镜能够将入射球面波转换为出射平面波（反之亦然），并在宽入射角范围内维持恒定口径，是实现低交叉极化、宽角度波束控制的理想方案。

然而，理想龙勃透镜要求折射率沿径向按

$$n(R)=\sqrt{2-R^2}$$（R 为归一化半径）

连续分布，自然界缺乏此类材料。传统做法是用一系列同心壳层逐级逼近理论介电常数曲线，对形状精度与层间介电常数精度要求极高。近年基于等效媒质理论（EMT）的3DP技术，通过在周期单元中填充预设体积的材料，使宽带、易加工的GRIN透镜成为可能。

论文指出两大痛点：其一，虽然PCB叠层、柱状透镜、平行板等二维方案能降低剖面，却难以在E面与H面同时兼顾窄波束与宽扫描角，唯有全尺寸（三维）透镜在方位与俯仰双平面宽角扫描上具备不可替代的优势；其二，介质孔、介质板、介质棒等常用单元结构在不同方向上呈各向异性，等效介电常数随入射角或极化态变化，无法同时提供稳定的线极化与圆极化性能。因此，兼顾轻量化与全极化的各向同性龙勃透镜设计意义重大。

核心创新：金刚石晶格带来各向同性 + 轻量化

紧凑轻量是现代无线通信与传感系统的首要目标。论文对比了常见晶体结构的空间占有率：采用简单立方堆积的立方晶格透镜虽具备良好各向同性，但空间占有率高达52%，导致透镜偏重；而金刚石晶胞中每个原子经四面体共价键与四个近邻相连，构成三维空间网络，既保持优异的各向同性，空间占有率却仅为34%，带来显著的减重收益。

在实现上，作者选用光敏树脂VeroClear（介电常数2.9、损耗角正切0.01）为基材。单胞由四个夹角为 arccos(－1/3)
的六棱柱与一个边长可变的立方体构成，受3D打印最小精度约束，六棱柱底边长 lm 取0.75 mm；单胞边长 a 为7.5 mm（小于自由空间半波长，以规避相位模糊）。通过S参数反演法提取单胞有效介电常数，改变内部聚合物立方体尺寸 wc
即可精确调控等效介电常数，完美匹配透镜设计需求。

为验证各向同性，作者将单胞绕x、y、z轴旋转，考察不同入射角下的等效介电常数。如图1所示，结果显示，在8－16 GHz内其等效介电常数保持相对恒定。与柱（post）、立方晶格、体心立方（BCC）等经典结构相比，金刚石晶格在不同入射角下等效介电常数最为稳定，其方差仅为 9.88×10－6，远低于柱结构（6.86×10－4）、简单立方（1.40×10－5）与BCC（2.77×10－3）。在离散化方面，由于晶胞是包含全部晶体对称性的最小重复单元，透镜需以整个晶胞为单位进行复制。凭借对称性，仅需构造八分之一球体即可通过镜像获得完整球形。作者将晶胞沿三轴平移四次形成八分之一结构，并划分为十层：由内到外各层等效介电常数从2.0递减至1.1，对应立方体边长 wc 从6.36 mm递减至2.44 mm；再经三次镜像拼合，得到直径147.8 mm的球形透镜。

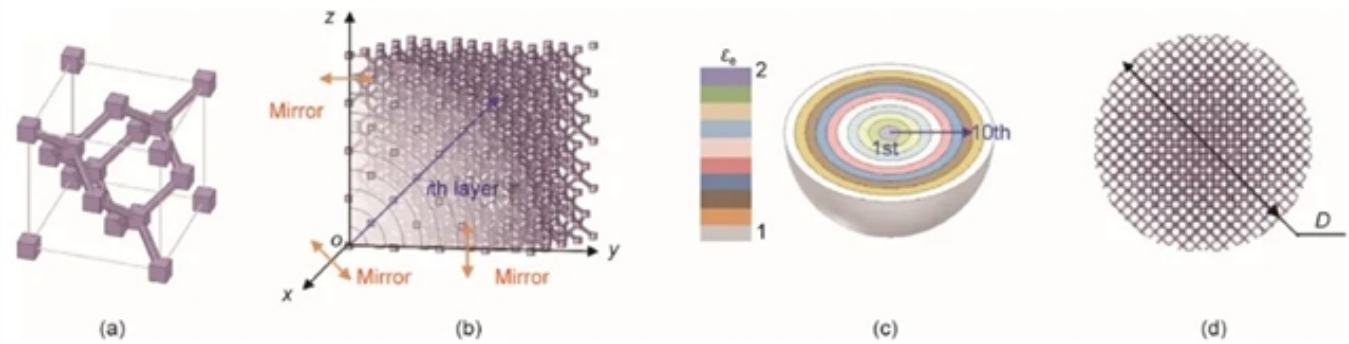


图1.金刚石晶格龙勃透镜的成型过程：(a) 晶胞；(b) 八分之一结构与十层划分；(c) 透镜离散化示意；(d) 透镜正视图

全极化馈电系统：一支喇叭六种极化

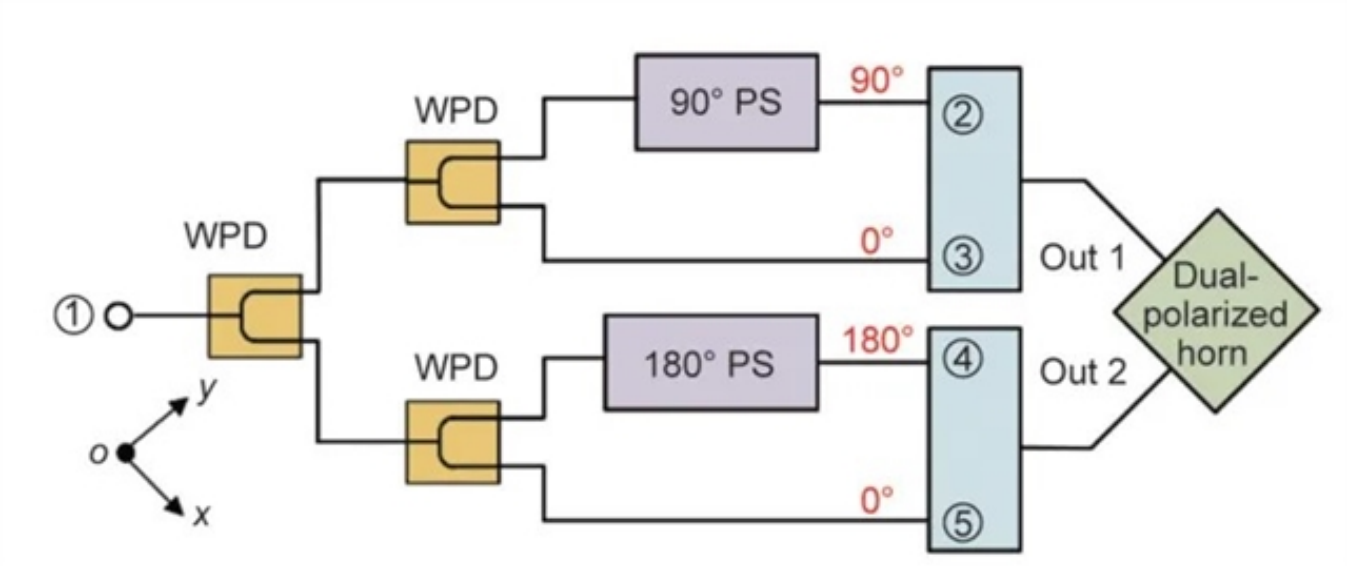


图2.宽带六极化馈电系统原理框图（含威尔金森功分器、90 ° 与180 ° 移相器）

为在X波段低成本地验证透镜的多极化聚束能力，作者设计了一套宽带六极化馈电系统，如图2所示，由一个双极化喇叭天线（见图3）与一个六极化馈电网络组成。喇叭采用双极化四脊结构，可分为四脊波导、线性渐变四脊喇叭段以及同轴-波导转换三部分，整体长度73.7 mm、口径宽46 mm；考虑到CNC铣削复杂结构的局限，喇叭以铝合金3DP工艺制造，工作频段覆盖7.8 – 13.8 GHz（S11 < − 10 dB）。

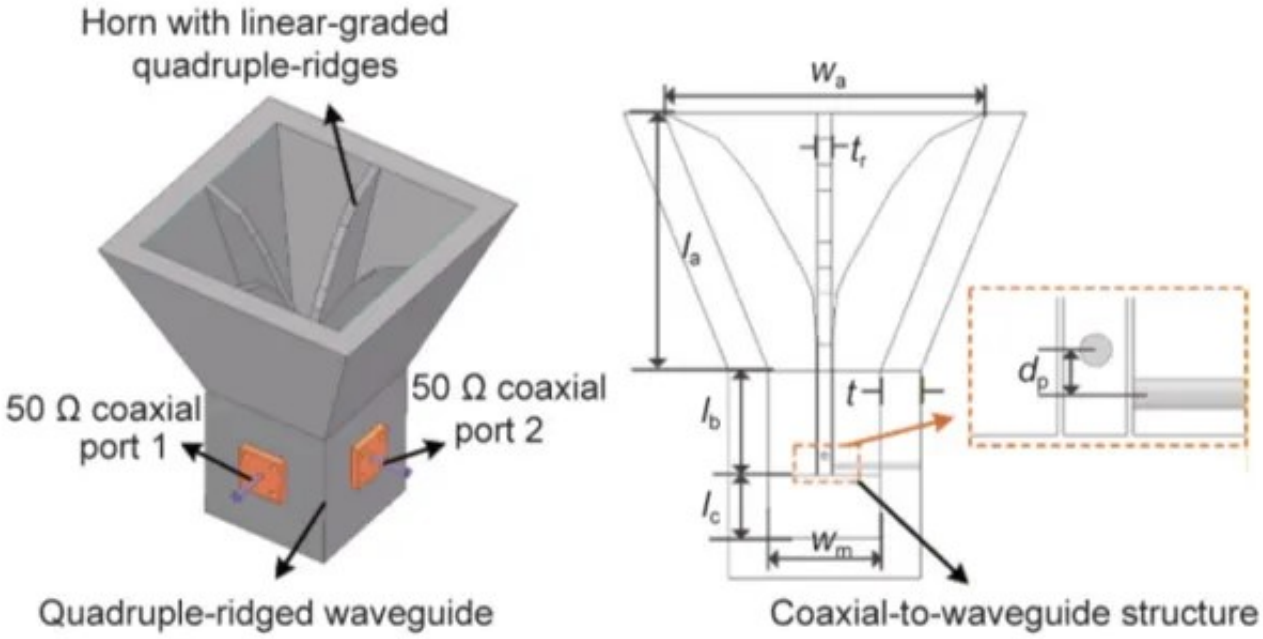


图3.双极化四脊喇叭天线结构

馈电网络集成了威尔金森功分器（WPD）、90 ° 宽带移相器与180 ° 宽带移相器，如图3所示，基于Rogers 4350基板（介电常数2.2、损耗角正切0.0009、厚度0.76 mm）实现。相较传统T型功分器

，WPD在阻抗匹配与端口隔离上更具优势，可降低输出信号间串扰；采用两节传输线进一步展宽带宽。移相器则通过加载短路枝节拓宽工作频带，并借助ABCD矩阵法结合MATLAB迭代设计。通过对网络通道的策略性调控，喇叭可获得H-LP、V-LP、+45°LP、−45°LP、LHCP、RHCP六种极化。

实测表明，在8–12 GHz频段内馈电网络反射系数低于−12 dB，相位差纹波小于±6°，幅度差小于1 dB，与仿真高度吻合，为全极化龙勃透镜天线的验证奠定了基础。

实测验证：全X波段、六极化、宽角扫描

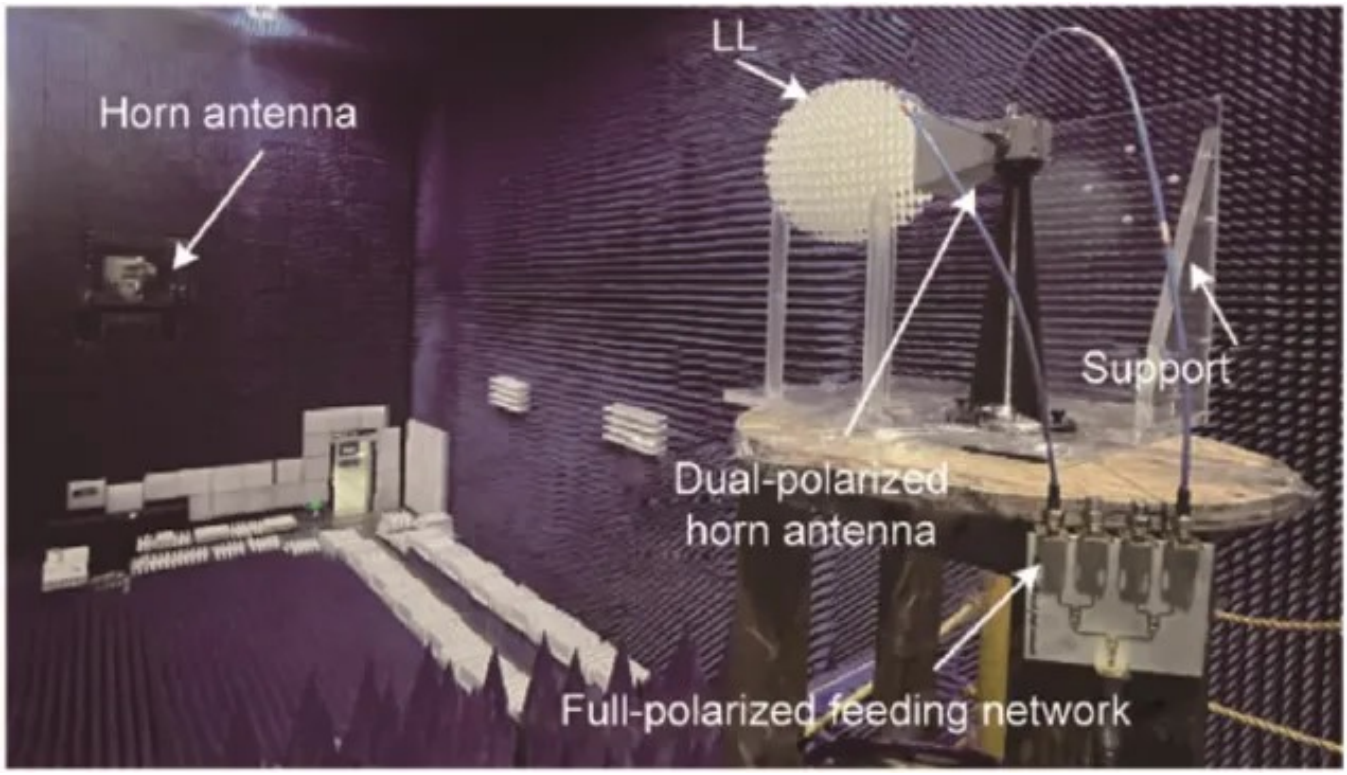


图4.微波暗室内龙勃透镜天线系统的测试装置

以双极化喇叭作为主馈源，如图4所示，仿真的电场分布清晰显示：喇叭辐射的球面波经透镜后在E面与H面均转换为平面波，验证了金刚石晶格设计方法的有效性。为满足加工要求，透镜直径最终调整为138 mm，经验证对性能影响甚微。

整机S参数显示，天线获得高达46.3%（7.8–13.8 GHz）的阻抗带宽，反射系数持续低于−10 dB，两端口间隔离度超过29 dB。对六种极化在8、10、12 GHz的辐射方向图测试表明，无论何种极化，工作带宽均覆盖整个X波段（8–12 GHz），且增益平稳。线极化实测增益在7.8–12.7 GHz范围内介于16.7–20.3 dBi之间。增益对极化变化的不敏感性，有力证实了所提透镜设计的各向同性。此外，通过旋转喇叭天线，该透镜天线可实现方位面360°、俯仰面±90°的扫描范围。

为凸显轻量化优势，作者与相同半径的传统立方晶格龙勃透镜进行了对比。二者在交叉极化鉴别上表现相近，但所提设计的仿真副瓣电平在E面与H面均优于−14

dB，而传统立方晶格透镜仅达－10.2 dB。这源于不同透镜结构中空间变化的介电常数分布形成了不同的电磁波传播路径。借助SolidWorks的重量分析，所提透镜质量仅为传统立方晶格透镜的55.8%，减重效果突出，且更环保、加工更简。

与已报道的球形、柱状、平行板、PCB等代表性龙勃透镜相比，本工作首次在球形透镜上同时实现双线极化、双圆极化及±45°线极化的全极化辐射，且工作带宽超过40%。更重要的是，论文提出了一种以晶体学原理为核心的电磁器件设计新范式：通过统筹结构设计、材料属性与波操控的多维策略实现协同优化，为材料科学与电磁工程的深度融合提供了新思路。

论文以金刚石晶格结构为核心，系统阐述了轻量化全极化龙勃透镜的实现机理、离散化方法与六极化宽带馈电系统设计，并通过仿真与实测验证了其在整个X波段内稳定的各向同性辐射能力。凭借轻质、高增益、低副瓣、灵活波束指向与极化切换等特性，所提天线在卫星通信、雷达感知、无线能量传输、微波成像等场景中展现出广阔前景，也为通感传一体化系统提供了高度通用且稳健的解决方案。（来源：EngineeringJournals微信公众号）

相关论文信息：https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809925008161

作者：洪伟 等 来源：《工程》

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转发