长春光机所等在无能耗制冷领域研发方面取得进展

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/30338.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！

长春光机所等在无能耗制冷领域研发方面取得进展。

热辐射是自然界中最重要的能量传递方式之一。而传统的黑体辐射因非定向、非相干、宽光谱、无偏振等固有特性，致使辐射体与其周围所有物体均进行热量交换，制约了传热效率和热流操控能力，限制了其实际应用。

以辐射制冷为例，过往的辐射制冷器件通常呈现出全向的热辐射特性，仅适用于开阔的水平表面如屋顶，来最大限度面向温度较低的天空，并尽可能隔绝器件与地面、周围物体、大气非透明窗口波段向下辐射等的热量交换。当它们被用于竖直表面如墙面、衣物、车辆侧面等实际场景时，器件面向低温天空的视场角缩小，需要大量吸收地面、周围物体以及大气非透明窗口波段向下辐射等的热量，导致其亚环境辐射制冷失效。尽管近年来有国际团队尝试调控热辐射的光谱或角度，但竖直表面的日间亚环境辐射制冷仍然面临挑战。

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员李炜团队与合作者，利用热光子学手段，实现了热辐射角度和光谱的跨波段协同调控，设计出具有跨尺度对称破缺性、角度非对称光谱选择性的
定向
发射器件——AS发射器件，实现了竖直表面的日间亚环境辐射制冷。相关研究成果以*Subambient daytime radiative cooling of vertical surfaces*为题，发表在《科学》（*Science*）上。

研究发现，大气透过率随天顶角增大而减小，对于竖直表面而言，其法向方向是大气透过率最低的方向，导致其极限制冷功率仅为~40 W
m^{-2}
；与水平表面相比，竖直表面吸收太阳的直接照射以及地面反射的太阳光。这些因素进一步对竖直表面的太阳光反射率以及红外热辐射的角度和光谱特性提出了更严苛的要求。

该研究从太阳反射率、大气透明窗口内的光谱选择性、热辐射角度非对称特性协同设计，以热力学、互易性、波导和声子激化共振等理论为基础，利用跨尺度对称破缺结构实现了热辐射在空间角度上的非对称分布以及在光谱上的选择性调控。

科研人员设计了打破镜面对称性的锯齿光栅结构。锯齿光栅结构的倾斜表面最外侧的Ag层可抑制地面发射的热辐射，而其横向表面上的SiN层可以向天空发射光谱选择性热辐射，从而提供角度非对称的热辐射特性。由于热力学和互易性的限制，锯齿光栅周期须大于波长才能实现角度非对称并支持光耦合的准连续频率覆盖。同时，锯齿光栅表面的Ag层可以阻挡太阳光进入锯齿光

栅内部，从而避免多次反射造成的太阳光吸收。为进一步提高发射器在太阳光谱的反射率，一层孔隙尺寸为0.3-1 μm的多孔聚乙烯薄膜（nanoPE）被覆盖在锯齿结构表面。Ag层和nanoPE薄膜的结合可以在整个太阳光谱范围内产生强烈反射。同时，nanoPE薄膜的深度亚波长孔隙尺寸使其在红外波段具有可忽略不计的散射效率，确保了其较高的红外透射率以及AS发射器的角度非对称光谱选择性辐射特性。

为验证AS发射器的全天候辐射制冷性能，该研究在晴朗的夏季进行了24小时连续的室外温度测量。在一整天中，AS发射器的表面温度始终低于环境温度。即使在炎热的正午，AS发射器仍保持约2.5 ° C的亚环境辐射制冷性能，相较于常规高性能辐射制冷器件和商用白漆分别低4.3°C和8.9°C。同时，该研究揭示了AS发射器在任意朝向下始终保持亚环境辐射制冷性能。

进一步，为探讨AS发射器在实际场景的制冷性能，该研究考虑建筑物之间的热辐射影响，并将所有发射器均面向正午最热的南向墙壁。得益于AS发射器的角度与光谱协同调控能力，通过改变锯齿光栅的宽高比，可调控热辐射的发射角度范围。因此，即使考虑建筑物之间的热辐射，AS发射器的亚环境辐射制冷亦有效，且其表面温度比常规高性能辐射制冷器件和商业白漆分别低3.5 ° C和4.6 ° C。在上述实验验证外，该研究理论分析了考虑建筑间热辐射时制冷功率的理论极限。

该研究攻克了竖直表面的日间亚环境辐射制冷，对辐射制冷的实际应用和节能减排具有重要意义；突破了热辐射角度、光谱的跨波段协同调控能力，展现了高自由度的热光子学操控能力，为操控热流和信息如新型高效冷却、加热、能量传输以及空间光学系统的高精度热控等提供了新机遇。

研究工作得到国家自然科学基金等的支持。

全向宽带发射器件和角度非对称光谱选择性发射器件在竖直表面的辐射换热过程

AS发射器件的设计

户外辐射制冷性能测试

考虑建筑之间热辐射影响的实验与理论分析

研究团队单位：长春光学精密机械与物理研究所

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