

文章编号: 1672-8785(2019)06-0027-08

近场热辐射的最新研究进展

张纪红 王 波

(烟台大学机电汽车工程学院, 山东 烟台 264005)

摘 要: 主要从理论数值模拟和近场辐射实验研究的角度介绍了近几年在近场热辐射传热方面的最新研究成果。理论研究的焦点主要集中在石墨烯复合材料、人工加工或合成超材料等方面的传热研究。实验研究的焦点是实验室基于纳米尺度近场热辐射测量的设备制造与方法创新。目前实验上已经实现了最小距离仅为 2 nm 的极近场热辐射测量。近场热辐射的进一步研究可为热光伏、辐射制冷以及高效能源收集应用提供理论基础。

关键词: 近场热辐射; 理论研究; 实验研究

中图分类号: O551.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.06.005

Recent Research Progress in Near-field Thermal Radiation

ZHANG Ji-hong, WANG Bo

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China)

Abstract: From the perspective of theoretical numerical simulation and near-field radiation experimental research, the latest research results in near-field thermal radiation heat transfer are introduced. The focus of theoretical research is mainly on heat transfer studies in graphene composites, artificial processing and synthetic metamaterials. The focus of experimental research is on laboratory equipment manufacturing and method innovation based on nanoscale near-field thermal radiation measurements. Very near-field thermal radiation measurements with a minimum distance of only 2 nm have been experimentally implemented. Further research on near-field thermal radiation provides a theoretical basis for thermal photovoltaic, radiant cooling and efficient energy harvesting applications.

Key words: near-field thermal radiation; theoretical research; experimental research

0 引言

从上世纪六七十年代开始, 关于近场热辐射的研究逐渐被报道。受当时科学技术水平的限制, 近场热辐射研究的进展比较缓慢, 也没有得到重视。经过半个多世纪的研究, 随着纳米技术、微加工技术的发展, 近场热辐射的研

究变得越来越重要。在已知宏观尺度时, 辐射传热机理常用普朗克黑体辐射理论来解释。当辐射体间的换热间距跟辐射波长在同一数量级时, 普朗克定律不再适用。此时近场热辐射会受到许多因素影响, 比如表面极化激元的作用、倏逝波的产生以及光量子隧穿效应等。

收稿日期: 2019-05-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(11604285); 山东省自然科学基金项目(ZR2016FQ11)

作者简介: 张纪红(1988-), 女, 山东日照人, 博士, 主要研究方向为微纳米尺度传热。

E-mail: zjh@ytu.edu.cn

就研究方法而言, 斯蒂芬-玻耳兹曼定律显然已不能准确地描述近场范围内的热辐射。1958 年, Rytov S M 等人^[1]建立了涨落耗散理论和涨落电动力学。研究表明, 基于该理论成果采用格林函数方法可对处于热平衡状态下物体的近场热辐射进行有效研究。在研究的材料方面, 自从 2004 年安德烈·海姆和康斯坦丁·诺沃肖洛夫发现了二维晶体的碳原子结构即石墨烯^[2], 由于石墨烯具有良好的光学和电子特性, 石墨烯迅速成为纳米尺度传热领域的研究重点。2012 年, 康斯坦丁·诺沃肖洛夫在《Nature》上发文指出, 石墨烯将被集中并广泛应用于电子、复合材料、能源再生与存储、传感器以及生物医药等领域^[3]。从材料和结构的角度看, 当前各类极化激元的出现使各种材料库更加丰富, 新材料的发射谱与热辐射谱的重合有可能使得这些材料能用于近场热辐射增强, 大大促进近场热辐射的研究。近年来, 对近场热辐射传热的研究已经不局限于单一材料的研究, 基于石墨烯的一些复合材料和以六方氮化硼为主的人工合成材料成为目前研究的主流。同时, 近场热辐射的应用也成为近年来研究的热点。近场热辐射应用的研究对废热回收、再生能源发展、辐射制冷等技术起着至关重要的作用。

本文主要是从近场热辐射理论数值模拟、近场辐射实验研究和一些基于近场辐射热传导的应用方面, 综述了近场热辐射的最新研究进展。

1 近场热辐射理论数值模拟

截止到 2010 年, 对近场热辐射的理论数值模拟主要集中在将模拟模型进行简化方面。大致分为三类简化模型, 一类是纳米粒子之间的模型, 第二类是半无限大介质与纳米粒子之间的模型, 第三类是两半无限大介质之间的模型^[4]。近年来, 研究的侧重点有所改变, 主要集中在对已有的一些常规材料的深入研究以及对组合超材料(如六方氮化硼双曲材料)的研究。另外, 基于石墨烯的表面等离激元耦合对

近场热辐射的影响也成为研究热点。

1.1 几种常规材料的近场辐射研究

华中科技大学的吴昊等人^[5]将模拟模型简化为两个半无限大平板, 研究了钨与掺杂硅平板之间的近场热辐射换热。该团队首先根据麦克斯韦方程和波动耗散理论求解并矢格林函数, 得到两无限大平板之间的热流辐射密度计算公式。计算结果显示, 当两平板之间的距离下降到纳米级别时, 辐射热流得到极大增强。在以上计算结果的基础上又分析了薄膜对近场辐射热流的影响。通过分析半无限大平板和薄膜之间、钨薄膜与硅薄膜之间以及加了金属基底的钨薄膜与硅薄膜之间的近场热辐射发现, 可以通过调节薄膜的厚度来调制近场热辐射热流。

哈尔滨工业大学的宋志鑫等人^[6]首先在涨落耗散定理基础上利用 MATLAB 软件分析计算了二氧化钒的近场态密度, 并详细研究了二氧化钒薄膜在倏逝波模式下近场热辐射的增强。研究表明, 相对于黑体辐射来讲, 在共振频率处表面极化声子的局域辐射态密度会产生非常明显的增强效应。

哈尔滨工业大学的张宇鹏等人^[7]在涨落电动力学基础上, 结合格林函数方法, 分析了碳化硅-真空多层膜的传热系数、态密度。研究了折射率、探测间距、介质层的厚度等结构参数在近场下对辐射场吸收功率的变化规律。研究表明: (1) 在表面波激发频率处, 减小探测间距会明显增强辐射场的吸收功率。(2) 多层膜结构中, 真空层和碳化硅层的厚度会对传热系数产生影响。(3) 对半无限长的碳化硅结构, 纳米粒子的吸收功率会出现两个极大值, 分别出现在碳化硅表面波激发频率和纳米粒子强吸收频率处。

1.2 组合超材料以及基于石墨烯的表面等离激元耦合的近场辐射研究

研究表明, 利用石墨烯表面等离激元相互耦合以及构建基于石墨烯的复合结构都可以达到增强近场热辐射的目的。

众所周知,不同材料的共振频率不同,这就导致材料间的表面波不能相互耦合,所以不同材料之间近场辐射的换热强度很低。北京航空航天大学吴会海等人^[8]利用并矢格林函数方法和涨落耗散理论,对手性超材料和双曲超材料(碳化硅纳米线阵列)进行研究,得出可以通过调节手性参数和填充系数优化材料在近场热辐射中的性能。同时,该学校的朱克勇等人^[9]也通过建立两半无限大平板双曲材料模型,研究了碳化硅纳米线阵列的双曲超材料的填充系数和不同双曲模式对近场热辐射以及穿透深度的影响。经过计算分析表明,填充系数越大,穿透深度越小。

哈尔滨工业大学的白阳等人^[10]首先在电磁超材料中引入磁电流元,采用格林函数方法结合涨落耗散理论,从理论上给出了半无限大电磁材料在真空中的热辐射局域态密度的解析表达式。接着研究了金属-电介质-金属渔网状电磁超材料。研究发现,这种电磁超材料在近红外波段开辟了新的近场热辐射和热传输增强频带。该作者提出了一种由金属-介质多层膜构成的双曲型电磁超材料结构,并通过优化设计在共振频率处获得了此种结构的传热系数,相对于 SiC 体块材料,其值增强了 30%。

北京航空航天大学的刘伟等人^[11]把石墨烯覆盖到六方氮化硼双曲材料上,研究六方氮化硼的表面声子极化激元与石墨烯表面等离子激元的耦合作用,并在此基础上计算了不同参数对辐射热流的影响。经计算得知,六方氮化硼的近场辐射热流会因为石墨烯覆盖而大幅度增强。同时浙江大学的尹格等人^[12]也研究了石墨烯-六方氮化硼等 3 种复合结构(见图 1)的特性。经分析得知,石墨烯表面的等离子激元和双曲色散型极化晶体的双曲声子激元相耦合会产生出新激荡模式。作者对单层石墨烯之间的近场热辐射进行系统研究发现,石墨烯表面等离子激元耦合可使近场热辐射得到增强。以此为基础,计算了石墨烯-六方氮化硼复合结构间的近场热辐射。计算表明,其传热特性有明显

的提高。最后作者还证明了石墨烯表面等离子激元对微球与平板之间的近场热辐射的增强效果明显提高。

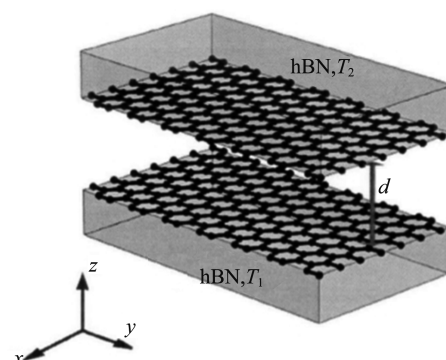


图 1 浙江大学的尹格在计算中采用的石墨烯-六方氮化硼复合结构的示意图

已知在谐振模式下两个物体之间的近场辐射热传递会显著增强,南昌大学赵启梅等人^[13]首先利用石墨烯和硅材料堆叠成的双曲超材料结构,基于石墨烯的表面等离子激元和超材料的表面等离子激元耦合,实现了近场热辐射的增强。然后利用有限元仿真,用两个单层共面石墨烯纳米带结构的石墨烯等离子激元耦合,理论上实现了一系列光电太赫兹器件,证明了太赫兹波对近场热辐射的贡献,促进了纳米光学的发展。

南昌大学周婷等人^[14]利用涨落耗散理论、涨落电动力学、有效介质理论和并矢格林函数方法,着重研究了基于石墨烯多表面耦合多层结构的近场热辐射特性。在组合辛普森方法基础上,经理论计算发现,在石墨烯的化学势和真空距均比较小时,石墨烯对近场热辐射的调控有重要影响。例如在对石墨烯-碳化硅-超材料结构进行分析时,石墨烯的化学势取 0.1 eV 时,当真空距设为 10 nm,碳化硅薄膜的厚度取为 10 nm,所得的结果约为黑体结果的 10^3 倍,这表明石墨烯对热辐射系数的增强有显著作用。

2 近场辐射实验研究

根据近场热辐射发生的机理可知,对近场热辐射的实验研究需两个实验物体间的距离小

于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 。间距越小,越能揭示近场热辐射传热的机理。因此,众多科研工作者设计了不同方法使两辐射体之间的距离更小。早在十年前,法国国家科学研究院光学研究所 Greffet 教授所在的科研小组就已经通过研制一套系统使辐射物体之间的间距从 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 减小到 30 nm 。但在 2013 年前,大部分实验研究还是在微米级别。随着微纳米技术的进步,近年来实验研究的两辐射体之间的距离已经达到纳米级别。就实验方法的研究而言,大连理工大学电子科学与技术学院的冯冲等人在 2013 年发表的论文中将此类实验的主要方法总结为可变间隙法^[15],此种方法到目前为止还是常用的实验研究方法。本文中,我们将实验研究材料分为常规材料与组合材料,对近几年的实验方法进行了总结。

2.1 常规材料的近场辐射实验研究

近场热辐射传热研究的主要目的之一是为了提高能源转换和热管理技术的潜在性能,但能够应用于工程应用的近场热辐射传热设备尚未实现。

将近场热辐射传热从实验室转化为工程应用的过程中,最大的挑战是制造独立的、结构坚固的设备,同时最小化寄生传导对总热效率的相对贡献。犹他大学机械工程系辐射能量转移实验室的 John Desutter 团队^[16]在能量转换和热测试方面建立了近场热辐射传热测试在实验室和工程应用上的桥梁。该团队使用标准的微/纳米制造技术方法成功地制备并表征了近场热辐射传热设备。该设备的发射器和接收器的厚度均为 $525\text{ }\mu\text{m}$,表面积为 $5.2\times 5.2\text{ mm}^2$ 。其特征是由硅谷微电子提供的表面粗糙度小于 0.2 nm 并在制造微柱的发射极基体中蚀刻了直径为 $215\text{ }\mu\text{m}$ 、深度为 $4.5\text{ }\mu\text{m}$ 的凹坑。该团队利用微米级深坑来制作直径相对较大的微柱(此处为 $20\sim 30\text{ }\mu\text{m}$)。这些凹坑使微柱明显长于发射端和接收端之间的公称间隙间距,从而使寄生传导对总热效率的贡献最小。这些微柱将发射器和接收器分开,在几微米深的凹坑

内,将微柱高度扩展到几微米,同时保持间隙间距在 $100\sim 1000\text{ nm}$ 范围内,从而实现了在间隙小于 110 nm 的宏观平面上测量掺杂硅的近场热辐射传热。通过实验该团队测试得到的最大近场热辐射超过黑体极限约 28.5 倍。该实验装置是实现近场热辐射传热在能量转换和热管理方面潜在应用的关键,同时该实验首次实现了在横向尺寸均超过 1 mm 的宏观表面进行纳米级间隙间隔成像的测试。

用深亚波长距离分离的物体之间的辐射传热可以超过传统的热辐射定律,因此一些理想的装置需要依赖于深亚波长区域(即距离小于 150 nm)的平行结构之间的辐射传热以及它们之间的高温梯度。而这些装置在此之前都没有在实验中得到呈现。美国康奈尔大学的 Raphael St-Gelais 团队^[17]利用高精度微电子机械位移控制装置,采用数值模拟和实验测量相结合的方法研究了深亚波长平行纳米结构间的近场辐射传热。实验中,由于高拉伸应力下高机械稳定性结构使热屈曲效应最小,实现了在大热梯度下小距离的分离,并且保证了实验中两个表面完全平行,最终实现了在冷热表面之间距离仅为 100 nm 的高温梯度(260 K)下对近场辐射传热的研究。得到的实验结果与前期模拟结果一致,误差在合理范围内。此实验首次证明了在深亚波长和高温梯度下平行物体之间的近场辐射传热。这种纳米尺度的实验方法为近场热辐射的应用如近场热光伏研究提供了一种新思路。

美国密歇根大学机械工程系 Song B 等人^[18]为了对薄膜厚度范围内的近场辐射传热进行实验研究,开发了一个含有分辨率大约 100 pW 热流计的实验平台,该平台能够定量研究从球形热表面(发射器)到接收平面的间隙大小相关的热流,并且可以将球形发射器与接收平面之间的间隙尺寸精确控制在 $20\text{ nm}\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 范围内。发射装置由一个悬浮的硅基区域组成,在该区域上附着直径为 $53\text{ }\mu\text{m}$ 的二氧化硅球体。接收平面由氮化硅制成,平面

悬浮区域覆盖不同厚度(50 nm~3 μm)的层,沉积在 100 nm 厚的金膜上。该团队对发射器和接收器之间的接触进行光学监测,实验上证明了当热表面和冷表面间隔的厚度与薄膜介质材料的厚度(50~100 nm)相当时,近场辐射传热会受到介质薄膜的显著影响,近场辐射会急剧增加。这些研究对于优化未来纳米尺度器件的热管理以及实现近场光刻和热光电是至关重要的。

在过去的一些近场热辐射传热实验中,虽然实验的进展使人们能够在 20~30 nm 的间隙中阐明近场辐射传热^[15],但是在极近场(小于 10 nm)的定量分析受到实验条件的极大限制。此外,开创性测量的结果与理论预测的数量级不同。美国密歇根大学 Kyeongtae Kim 团队^[19]创造性地利用具有嵌入金-铬热电偶的高灵敏度定制探针(装置如图 2 所示)即扫描热显微镜探针,在测量这些间隙上微小热流的同时,实现了稳定地保持这些间隙的存在,从而使在极近场(小于 10 nm)的间隙进行辐射传热实验成为可能。该团队结合能周期性调温的新型微纳器件,最终实现了间距仅为 2 nm 的辐射传热测量。实验中,该团队在扫描探针和微纳器件上沉积了合适的金属或介电层,从而能够直接研究硅-硅、氮化硅-氮化硅和金-金表面之间的近场辐射。研究发现,不同材料组合之间的极近场热辐射有差异,计算结果提供了明确的证据,波动电动力学准确地描述了极近场热辐射。该团队的结果建立在极近场热辐射和近场辐射传热建模中的光动力学的基础上,为电介质和金属表面之间的近场辐射换热的增强首次提供了实验证据。

2.2 组合超材料的近场辐射实验研究

石墨烯具有较大的平面导热系数,常被用作纳米器件的热管理材料。同时,石墨烯具有较强的将入射光转化为电热的能力,可用于产生光电流的热电子,在数据通信和光采集等领域有广泛的应用。因此,理解并最终控制石墨烯-范德瓦尔斯异质结构中的热场至关重要。

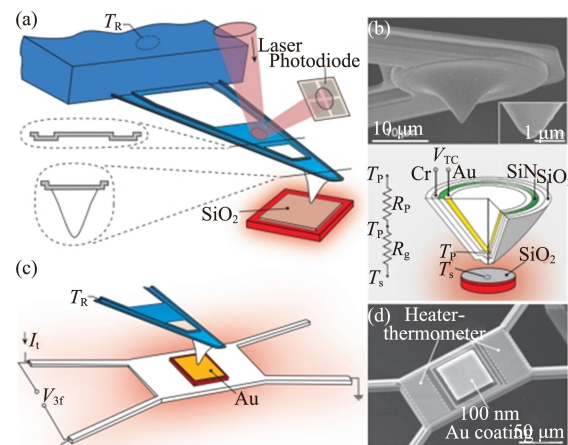


图 2 密歇根大学 Kyeongtae Kim 团队的实验装置示意图

石墨烯由层状材料(如六方氮化硼)包裹得到的材料可能极大地改善电子和光电器件的性能。

巴塞罗那科学与技术研究所的 Klaas-Jan Tielrooij 团队^[20]利用随时间变化的光电流测量方法,发现了一个有效的平面外能量传输通道。在这个通道中,石墨烯中的载流子与层状材料中的双曲线极化声子耦合,这种双曲形的冷却对于六方氮化硼非常有效,冷却时间可达到皮秒级。这是因为氮化硼中的高动量双曲极化声子促使近场能量发生了转移。该团队通过改变载流子密度和晶格温度研究了这种传热机理,发现在不需要调节任何参数的情况下,这种传热机理与理论非常吻合。这些研究解决了六方氮化硼器件体系结构中的平面外传热问题。此外,该团队预测使用其他分层介质(如 MoS_2)也可以显著降低冷却速度。这项研究中的热石墨烯载流子与声子之间的近场耦合可能为纳米光子学、超高分辨率光镜和纳米热管理等领域的新方法铺平道路。

对石墨烯和碳纳米管的显著热传输特性进行研究有利于解决集成电路的高性能冷却解决方案。共价键合石墨烯-碳纳米管(G-CNT)复合结构(见图 3)是最近合成的一种结构,人们发现这种结构可以显著提高导热系数,同时增大表面接触面,能够更有效地传热。同济大学的 Chen J 团队^[21]将 G-CNT 浸入水中,通过固液相互作用建立额外的散热路径,从而在最

高可达 10^4 W/cm^2 的恒定功率下实现热表面的持续冷却, 数据图如图 4 所示。

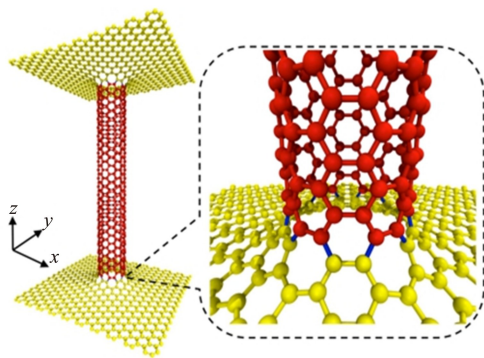


图 3 同济大学 Chen Jie 团队实验用的石墨烯-碳纳米管复合结构的示意图

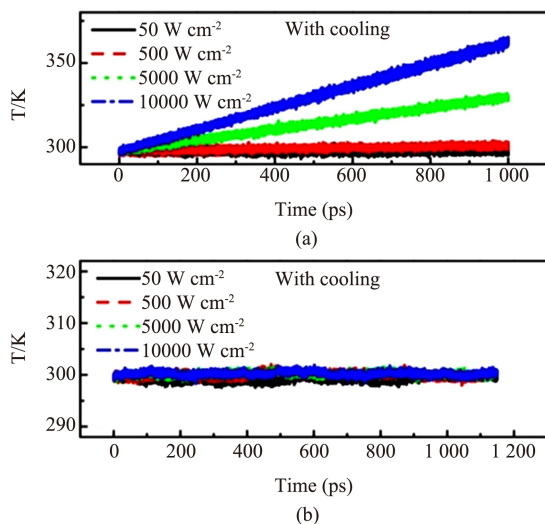


图 4 同济大学 Chen Jie 团队的实验数据图

经研究可知, 在该功率密度下持续加热可以使晶片的表面温度在 1 ns 内增加 60 K, 而当水中浸入 G-CNT 结构时, 在同样条件下, 晶片表面的温度能保持不变。这些结果表明, G-CNT 混合浸入水中是一种解决高温高热流面的超快冷却方案。综上所述, 该团队通过瞬态非平衡分子动力学模型模拟证明了 G-CNT 混合材料是一种很有前途的高性能冷却应用。与单个碳纳米管相比, G-CNT 杂化具有独特的优势, 通过碳纳米管阵列将散热能力并行化, 同时提供一个平面接触面积, 降低接触热阻, 从而显著加快冷却过程。

法国巴黎大学的 Wei Y 等人^[22]利用复合

输运和噪声测温, 证明了在六方氮化硼晶体管上的双层石墨烯具有显著的热性能, 以威德曼-弗朗兹定律传导和六方氮化硼双曲声子极化子发射为主。在高偏置条件下, 通过降低补偿载流子的密度和 Zener-Klein 隧道效应, 六方氮化硼晶体管上具有局部栅的双层石墨烯被驱动到几乎完美的电流饱和状态。该团队揭示了一种新的非平衡双曲声子极化子的发射过程, 该过程屈服于在高掺杂下观察到的温度稳定状态。这种高迁移开辟了许多前景: 在应用方面, 它为射频功率放大和纳米器件冷却通路的设计等方面提供了一个有前途的平台; 在基础科学方面, 它开辟了隧道过程中产生的非平衡载流子的冷却通道研究, 促进了石墨烯作为非平衡双曲声子极化子光学专用光源的发展。

3 基于近场辐射热传导应用的研究

最近几年的研究已经可以证明各种复合材料对近场热辐射的影响。2016 年, 朱克勇等人^[9]通过研究证明了在近场热辐射穿透深度方面双曲材料更有优势, 这使双曲材料能够更广泛更深层次地应用于热光伏和辐射制冷等领域。

斯坦福大学金兹顿实验室的 Zhao B 团队^[23]分析了一种近场系统, 该系统由等离子发射体(氧化铟锡)和窄带隙光伏电池(InAs)组成, 在深亚波长的范围有较高和较大的余热回收能量密度。该团队发现, 该系统在 900 K 温度时的发电效率高达 40%, 功率密度为 11 W/cm^2 。随后, 该团队利用薄膜中的热激等离子体共振, 将铂层覆盖到窄带隙光伏电池表面, 又将功率密度提高至 31 W/cm^2 。这项工作有利于深层次理解在小间隙距离(小于 10 nm)中表面等离子体极化声子在热传递中的主导作用, 该研究还证明了使用近场热泵在废热回收应用的巨大潜力。

该团队还基于近场热辐射研究了光子系统^[24], 此系统由热源侧的发光二极管(Light-Emitting Diode, LED)和远离热源侧的光伏电池组成(见图 5)。光伏电池产生的部分电能被

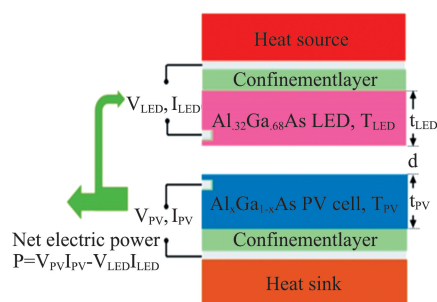


图 5 斯坦福大学的 Zhao Bo 团队设计的光子系统示意图

用来驱动 LED。该研究表明了利用光子方法进行废热回收的巨大潜力,在近场情况下,该系统的效率和功率密度显著超过现有的热固相方法。当间隙间距为 10 nm 时,将热侧温度设置为 600 K,将冷侧温度设置为 300 K,所产生的电能密度和热电转换效率分别可以达到 9.6% 和 9.8%。

4 结束语

纳米技术的发展使当前各类电子器件的结构尺寸越来越小,各类集成电路体积也越来越小,基于近场热辐射的研究解决传热散热问题就显得越发重要。本文通过总结近几年关于近场热辐射传热的研究,展示了最新的关于近场热辐射的数值模拟和实验测量方法与成果。到目前为止,更小距离下的近场热辐射传热的数值模拟和实验测量依旧是该领域的重要研究课题。随着微机电系统与计算机技术的进步,探针的制造工艺得到巨大提升,众多科研工作者逐步实现了更小距离的近场热辐射测量,目前实验测量极近场距离(小于 10 nm)的热辐射已经实现。

虽然近场热辐射的理论研究已被越来越多的实验证实,但由于实验设备设计制造困难,此类实验的实验成本较高而且实验条件难实现,以至于很多理论模拟结果没办法得到验证。另一方面,实验中测量间距不易控制,实验产生的信号微弱,不易接收,依旧是阻碍实验成功实现的重要因素。通过设计实验实现理论模拟所提出的结构,将实验得到的数据和理

论结果相结合,是下一步要研究的重点。

参考文献

- [1] Rytov S M. Theory of Electrical Fluctuations and Thermal Radiation [M]. Moscow: Academy of Sciences Press, 1958.
- [2] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films [J]. *Science*, 2004, **306**: 666–669.
- [3] Novoselov K S, Fal'ko V I, Colombo L, et al. A Roadmap for Graphene [J]. *Nature*, 2012, **490**: 192–200.
- [4] 张春, 曾志刚, 杨艳, 等. 近场热辐射研究的最新进展 [J]. *红外*, 2010, **31**(12): 1–6.
- [5] 吴昊. 铎与掺杂硅平板间的近场辐射换热研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [6] 宋志鑫. VO₂ 薄膜结构的热辐射特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [7] 张宇鹏. SiC-真空多层膜结构的近场热传输特性 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [8] 吴会海, 黄勇, 朱克勇. 手性超材料和双曲超材料近场热辐射研究 [J]. *工程热物理学报*, 2016, **37**(3): 597–601.
- [9] 朱克勇, 黄勇, 吴会海. 双曲超材料近场热辐射穿透深度研究 [J]. *工程热物理学报*, 2016, **37**(11): 2393–2396.
- [10] 白阳. 电磁超材料红外热辐射和近场热传输特性 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [11] 刘伟, 黄勇, 吴会海. 石墨烯-六方氮化硼异质结构近场热辐射研究 [J]. *工程热物理学报*, 2017, **38**(12): 2665–2669.
- [12] 尹格. 石墨烯表面等离激元及其在近场热辐射中的应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [13] 赵启梅. 石墨烯等离激元在近场辐射热传输中的作用研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
- [14] 周婷. 基于石墨烯的多表面耦合的近场热辐射研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
- [15] 冯冲, 唐祯安, 余隽. 近场热辐射实验测量方法的进展 [J]. *材料导报*, 2013, **27**(5): 55–60.
- [16] Desutter J, Tang L, Mathieu F. Near-field Radiative Heat Transfer Devices [J]. *In Press*.
- [17] St-Gelais R, Zhu L X, Fan S H, et al. Near-field

- Radiative Heat Transfer Between Nanostructures in the Deep Sub-wavelength Regime [J]. *Nature Nanotechnology*, 2016, **11**: 515–519.
- [18] Song B, Ganjeh Y, Sadat S, et al. Enhancement of Near-field Radiative Heat Transfer Using Polar Dielectric Thin Films [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, **10**: 253–258.
- [19] Kim K, Song B, Fernández-Hurtado V, et al. Radiative Heat Transfer in the Extreme Nearfield [J]. *Nature*, 2015, **528**: 387–391.
- [20] Tielrooij K J, Hesp N C H, Principi A, et al. Out-of-plane Heat Transfer in Van Der Waals Stacks Through Electron-hyperbolic Phonon Coupling [J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, **13**: 41–46.
- [21] Chen J, Walther J H, Koumoutsakos P. Ultrafast Cooling by Covalently Bonded Graphene-carbon Nanotube Hybrid Immersed in Water [J]. *Nanotechnology*, 2016, **27**: 465705.
- [22] Wei Y, Berthou S, Lu X B, et al. A Graphene Zener-Klein Transistor Cooled By a Hyperbolic Substrate [J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, **13**: 47–52.
- [23] Zhao B, Chen K F, Buddhiraju S, et al. High-performance Near-field Thermophotovoltaics for Waste Heat Recovery [J]. *Nano Energy*, 2017, **41**: 344–350.
- [24] Zhao B, Santhanam P, Chen K F, et al. Near-Field Thermophotonic Systems for Low-Grade Waste-Heat Recovery [J]. *Nano Letters*, 2018, **18**: 5224–5230.