

新工科背景下“微纳尺度热物性”课程建设路径研究

张中印¹, 程光华², 张国栋², 王江²

1、西北工业大学微电子学院 陕西 西安 710072; 2、西北工业大学光电与智能研究院
陕西 西安 710072

[摘要]微纳尺度下的热能输运机制不同于宏观尺度, 涉及声子输运、电子-声子相互作用、非傅里叶效应等复杂现象。然而, 国内高校在该课程的体系化建设、教材资源和实验教学方面仍面临诸多挑战。本文提出了一种微纳尺度热物性课程设计方案, 在教学方法上, 采用互动式讲授、案例分析、实验教学等多元手段, 以提高学生的实践能力和创新思维。此外, 本文还探讨了合理的考评模式与反馈机制, 以确保课程质量和持续优化。本研究可为微纳尺度热物性课程建设提供借鉴, 推动该领域的教育创新和人才培养。

[关键词]微纳尺度热物性课程建设; 多元化教学方法; 考评模式与反馈

[中图分类号] G642 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1687-9534(2025)-0066-13 **[收稿日期]** 2025-04-09

一、引言

(一) 课程建设重要性

随着新工科建设的推进, 工程教育正从传统学科体系向交叉融合、创新驱动的模式转变。在纳米技术和微机电系统的迅猛发展的时代, 微纳尺度下的热传导现象已成为材料科学、物理学、电子工程等多个学科研究的热点。在微纳尺度下, 热传导机制展现出与宏观尺度截然不同的特性, 如量子隧穿效应、电子与声子的散射机制等, 这些现象对于设计高效能源转换系统、提高电子器件的热管理能力以及开发新型热控材料等方面具有重要意义。因此, 培养能够深入理解并应用微纳尺度传热理论与技术的人才, 对于科学研究和工程技术的进步至关重要。

然而, 微纳尺度热物性作为一门新兴的

跨学科领域, 在传统的热力学和热传递课程体系往往未能得到充分的重视。学生在标准课程中获得的知识, 主要集中于宏观尺度下的热传导机制, 而对于微观和纳观尺度下的热传递现象及其理论框架, 往往缺乏深入的理解和实践经验。此外, 微纳尺度传热领域的快速进展也要求教育者不断更新教学内容和方法, 以适应新的科学发现和技术需求。在此背景下, 构建一门系统、前沿的“微纳尺度热物性”课程, 不仅能帮助学生掌握微纳尺度热传输的基本理论与计算方法, 还能培养他们运用多尺度建模、先进测试技术和数据分析等手段解决实际工程问题的能力。这对于推动新工科背景下的人才培养模式改革, 提高学生的科研素养和工程创新能力, 具有重要的理论与实践价值。

（二）国内外课程建设现状

微纳尺度热物性研究起源于 20 世纪 80 至 90 年代，欧美高校在微纳尺度传热教育方面起步较早，许多著名高校已建立了系统的课程体系，并出版了多部权威教材，为该领域的研究和教学奠定了基础。美国麻省理工学院早在 1990 年代便开设了微纳尺度热物性相关课程，如 Nano-to-Macro Transport Processes^[1]，该课程围绕声子输运、电子热传导，结合实验和计算模拟，使学生能够掌握微纳尺度传热的基本原理和应用。佐治亚理工学院的 Nanoscale Heat Transfer 课程则以电子-声子相互作用、近场热辐射关键理论等为核心内容展开，并结合前沿研究进展，使学生具备独立分析和解决微纳尺度传热问题的能力^[2]。此外，加州大学伯克利分校、伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校、佐治亚理工学院等高校均设有相关课程。国外研究者在微纳尺度传热教育方面还编写了多部权威教材，如 Nanoscale Energy Transport and Conversion^[3]，Nano/microscale Heat Transfer^[4]，Fundamentals of Heat and Mass Transfer^[5]，这些教材系统性地介绍了微纳尺度传热的基础理论、实验方法及工程应用，为该领域的教育提供了重要支撑。国外高校的微纳尺度热物理课程通常与前沿研究紧密结合。例如，MIT、斯坦福大学等高校不仅在课程中介绍传统的傅里叶定律扩展模型，还重点讲解非平衡热传输、超快激光热测量等实验技术，并结合机器学习、第一性原理计算等先进方法，推动课程内容的现代化。

近年来，国内高校逐步重视微纳尺度热物性的教学与研究，在课程建设和内容引入方面取得了一定进展。以清华大学为例，其在工程热物理与微电子方向的研究生课程中已纳入微纳尺度热输运相关内容，涵盖电子-声子相互作用、非傅里叶热传导、纳米尺度热测量等前沿知识。大连理工大学则在本科及研究生层面开设了“材料热物性”“材料传热问题”等课程，强调实验方法与理论分析并重，使学生掌握微纳尺度传热的关键特征及实验技术。国内在教材建设方面也取得了一定进展，如《微纳米材料和结构热物理特性表征》^[6]《纳米结构的非傅里叶导热》^[7]等，在一定程度上填补了国内教材建设的空白。然而，实验教学仍是目前教学体系中的薄弱环节。多数高校仍依赖科研实验室的小规模仪器教学，受限于设备昂贵、维护成本高等问题，先进表征技术如时间域热反射等尚难以在本科及研究生阶段普及应用，制约了学生实验能力的培养。

针对上述问题，本文提出了一种微纳尺度热物性课程设计方案，将系统探讨该课程建设路径，包括课程内容设计、教学方法以及评估机制。通过本研究，有望为微纳尺度热物理及相关领域的教育实践提供有价值的见解与参考。

二、课程内容设计方案

合理且丰富的课程内容设计是微纳尺度热物性课程建设的关键。本文提出 5 个方面的课程内容，包括：①引言与基础理论部分，主要介绍微纳尺度传热的重要性、应用背景

和基本概念。回顾经典的热传导理论，介绍量子力学在微纳尺度传热中的基本原理。②微纳尺度热输运机制部分，从晶格动力学角度出发，探讨声子在固体中的传播机制，以及其在热传导中的作用。讲解电子在金属和半导体中的热传导机制。③先进实验方法与技术部分，介绍测量微纳尺度热传导的常用实验技术的基本原理、实验系统、适用范围、实验数据处理方法以及误差分析等。④理论计算方面，介绍用于模拟微纳尺度传热的数值方法，如第一性原理、分子动力学模拟、有限元分析等。⑤课程项目与研究讨论方面，鼓励学生团队合作，就特定主题进行深入研究，并呈现其成果。组织 1-2 次微纳尺度热物理相关研究话题研讨会，让每位学生参与其中。

三、课程教学方法改革

为提升学生在微纳尺度热物理课程中的主动学习能力、理论理解深度与实践应用能力，本文设计并实施了一套融合多种教学手段的综合教学方法。首先，在课堂教学中采用互动式讲授，结合问题引导与课堂讨论，鼓励学生积极提问，参与问题的分析与解决，强化对核心概念和原理的深层理解。课程内容融入多个典型应用案例，如纳米材料中的热传导、微电子器件的热管理及微流体中的热传递等，引导学生分析实际问题与可能的解决路径，提升其应用能力与工程思维。

课程设置中强调项目导向与协作学习，学生以小组形式围绕特定主题开展研究，完成项目设计、执行与成果展示，培养团队协

作与创新能力。实验教学方面，结合基础实验与仿真模拟，学生通过动手操作观察微纳尺度传热现象，利用计算工具模拟不同条件下的传热过程，从而深化对复杂物理行为的理解，并提升实验设计与数据分析能力。

同时，引入翻转课堂模式，学生课前通过在线资源进行自主学习，课堂时间则用于讨论、答疑与实践操作，有效提高课堂互动性与学习效率。教学过程中还邀请行业专家与学术研究人员开展专题讲座，介绍前沿研究与应用动态，拓宽学生视野，增强课程的现实关联与前瞻性。

在课程末期，学生需完成研究报告或项目文档的撰写，并进行口头展示，以训练其科研写作、学术表达与公众演讲能力。通过上述多元化教学方法的综合运用，课程有效激发了学生的学习兴趣，提升了其实践操作与问题解决能力，同时促进了其自主学习与团队合作意识的培养。

四、课程考评模式与反馈机制

为系统提升微纳尺度热物性课程的教学质量，本文构建了一套包含过程性评估、总结性评估、反馈调整与持续改进在内的多维教学评价体系。在教学实施过程中，通过布置与课程内容紧密相关的作业与实践任务、要求提交小组项目进展报告，以及鼓励课堂提问与讨论，对学生的理论掌握程度和批判性思维能力进行动态评估。课程末设置包括理论与计算题的期末考试，并组织综合性小组项目展示，全面考察学生的知识综合应用能力与沟通表达能力；为实现教学内容与方

法的动态优化，项目通过问卷调查与访谈收集学生反馈，并鼓励教师基于教学实践与学生学习成效进行反思与调整。此外，课程建设团队定期组织由教学专家、骨干教师与学生代表参与的课程评估会议，讨论实施成效与改进路径，推动教学改革的持续深入。该体系不仅有效促进了学生理论与实践能力的协同发展，也为微纳尺度热教育课程的系统建设与持续优化提供了实践路径和经验借鉴。

五、结语

本文在新工科背景下，提出了一种系统微纳尺度热物性课程设计方案，包括基础理论、先进实验方法、数值计算方法、工程应用等多个课程内容模块。在教学方法上，采用互动式讲授、案例分析、实验教学、计算模拟和翻转课堂等多元手段，以提高学生的实践能力和创新思维。此外，本文还探讨了合理的考评模式与反馈机制，以确保课程质量和持续优化。本研究可为微纳尺度热物理及相关领域的教育实践提供有价值的见解与参考，推动新工科背景下的人才培养模式改革，提高学生的科研素养和工程创新能力。

基金项目:2024 年度西北工业大学教育教学改革研究项目“新工科背景下新兴交叉专业“微纳尺度热物理基础”建设路径研究”(2024JGY70); 2025 年度西北工业大学教育教学改革研究项目“可视化问题导引与科研驱动在光电类课程教学模式改革中的应用”

(2025JGZY52); 2025 年教育部产学合作协同育人项目“光电信息技术专业教师数字人微课建设能力提升培训项目”(241203327304451)。

作者简介:张中印(1991-),男,河北邯郸人,博士,西北工业大学副教授;程光华(1976-),男,陕西安康人,博士,西北工业大学教授;张国栋(1989-),男,陕西西安人,博士,西北工业大学副教授;王江(1988-),男,山西大同人,博士,西北工业大学副教授。

参考文献:

- [1]<https://ocw.mit.edu/courses/2-57-nano-to-macro-transport-processes-spring-2012/>
- [2]<https://www.coursicle.com/gatech/courses/ME/6309/>
- [3]Chen G. Nanoscale energy transport and conversion: a parallel treatment of electrons, molecules, phonons, and photons[M]. Oxford university press, 2005.
- [4]Zhang Z M. Nano/microscale heat transfer [M]. New York: McGraw-Hill, 2007.
- [5]Bergman T L. Fundamentals of heat and mass transfer[M]. John Wiley & Sons, 2011.
- [6]唐大伟,王照亮.微纳米材料和结构热物理特性表征[M].科学出版社,2010.
- [7]曹炳阳.纳米结构的非傅里叶导热[M].科学出版社,2023.

Research on the Curriculum Development Path of "Micro/Nanoscale Thermal Properties"
under the New Engineering Background

Zhang Zhongyin¹, Cheng Guanghua², Zhang Guodong², Wang Jiang²

1 School of Microelectronics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi, 7100721; 2. Institute of Optoelectronics and Intelligence, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi, 710072

Abstract: The mechanisms of heat transfer at micro/nanoscale differ significantly from those at macroscale, involving complex phenomena such as phonon transport, electron-phonon interactions, and non-Fourier effects. However, domestic universities still face numerous challenges in the systematic development of such courses, including the lack of teaching materials and experimental resources. This paper proposes a course design for thermal properties at micro/nanoscale, incorporating interactive lectures, case studies, and hands-on experiments to enhance students' practical skills and innovative thinking. Furthermore, a reasonable assessment framework and feedback mechanism are discussed to ensure teaching quality and continuous improvement. This study provides valuable insights for the development of micro/nanoscale thermal properties courses, promoting educational innovation and talent cultivation in this field.

Key words: Micro/nanoscale thermal properties course development; diversified teaching methods; assessment model and feedback