

从电子分布到价值引领：费米-狄拉克函数教学中的思政意蕴挖掘

刘文* 吴凯邦 胡淳 陈荣鑫

龙岩学院, 中国·福建 龙岩 364012

摘要: 在半导体物理教学中, 费米-狄拉克概率函数作为描述电子在能级上分布的核心理论, 不仅是理解半导体导电机制的基础, 更蕴含着丰富的思政教育资源。本文结合费米-狄拉克函数的物理内涵、发展历程及应用场景, 探索将科学精神、家国情怀、创新意识等思政元素融入教学的具体路径, 通过历史溯源、案例分析、价值辨析等方式, 实现知识传授与价值引领的协同育人, 为半导体物理课程思政建设提供实践参考。

关键词: 半导体物理; 费米-狄拉克概率函数; 教学改革

From Electron Distribution to Value Guidance: Exploration of Ideological and Political Implications in the Teaching of Fermi-Dirac Function

Liu Wen*, Wu Kaibang, Hu Chun, Chen Rongxin

Longyan University, China Fujian Longyan 364012

Abstract: In the teaching of semiconductor physics, the Fermi-Dirac probability function, as the core theory describing the distribution of electrons in energy levels, is not only the foundation for understanding the conduction mechanism of semiconductors, but also contains abundant ideological and political education resources. Combining the physical connotation, development history and application scenarios of the Fermi-Dirac function, this paper explores specific paths to integrate ideological and political elements—such as the spirit of science, patriotism, and innovation awareness—into teaching. Through methods including historical tracing, case analysis, and value discrimination, it realizes the collaborative education of knowledge impartment and value guidance, thereby providing practical references for the construction of ideological and political education in the Semiconductor Physics course.

Keywords: Semiconductor physics; Fermi-dirac probability function; Teaching reform

0 引言

半导体物理作为电子信息、微电子等专业的核心基础课程, 承担着培养学生掌握半导体材料与器件物理原理的重任。在当前国家强调科技自立自强、突破“卡脖子”技术的背景下, 如何在传授专业知识的同时, 引导学生树立正确的价值观、培养家国情怀与科学精神, 成为课程教学改革的重要方向。费米-狄拉克概率函数作为统计物理与半导体物理的交叉点, 其理论构建过程体现了科学家的探索精神, 其物理内涵蕴含着辩证思维, 其应用场景关联着国家产业需求, 是开展课程思政的优质载体。本文基于费米-狄拉克函数的教学实践, 探讨思政元素的挖掘与融入方法, 以期同类课程提供借鉴^[1]。

1 费米-狄拉克函数的科学史溯源：培育科学精神与历史使命感

1.1 从经典统计到量子统计：彰显质疑与突破精神

费米-狄拉克概率函数的诞生源于对经典统计力学无法解释电子行为的突破。19世纪末, 麦克斯韦-玻尔兹曼统计在描述气体分子运动时取得巨大成功, 但在解释金属中电子的比热问题时遭遇困境——理论计算的电子比热远大于实验值。这一矛盾促使物理学家重新审视经典统计的适用边界。1926年, 费米和狄拉克分别独立提出了适用于自旋为半整数粒子(费米子)的统计规律, 即费米-狄拉克统计, 其核心函数为:

$$f(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/(k_B T)} + 1}$$

其中, E_F 为费米能级, K_B 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度。这一函数成功解释了电子在低温下的量子特性: 当 $T=0K$ 时, 电子填满费米能级以下的所有能级, 而费米能级以上的能级全空, 体现了泡利不相容原理对电子分布的约束。

在教学中, 可通过还原这一科学发现过程, 引导学生思考: 经典理论的局限为何会出现? 费米和狄拉克是如何突破思维定势, 将量子力学原理引入统计物理的? 通过这些问题, 培养学生“不迷信权威、敢于质疑现有理论”的科学精神。同时, 强调科学研究中“问题意识”的重要性——正是对“电子比热之谜”的执着探索, 推动了统计力学的范式转换, 这对学生今后从事科研工作具有重要启示。

1.2 中外科学家的贡献对比: 厚植家国情怀

在讲解费米-狄拉克统计的发展时, 不仅要介绍费米、狄拉克等国外科学家的贡献, 更要挖掘中国物理学家在相关领域的探索。例如, 黄昆先生在 20 世纪 50 年代研究半导体中电子的统计分布时, 面临我国实验设备匮乏的困境, 仍通过理论推导揭示了半导体中光吸收与晶格振动的耦合机制, 结合费米-狄拉克函数与晶格振动的相互作用, 提出了“黄昆方程”, 其成果被国际学界称为“半导体光学性质研究的基石”, 为半导体光学性质的研究奠定了基础^[2,3]。

值得注意的是, 费米在意大利建立中子物理实验室时同样面临资源短缺, 却以“问题导向”推动学科发展; 黄昆在新中国成立初期白手起家创建半导体学科, 二者虽处于不同时空, 却展现出科学探索中“困境突围”的共同特质。通过这种跨时空对比, 可提炼出“科学探索的普适方法论”, 引导学生认识到: 科学探索是全人类的共同事业, 但科学家的研究方向始终与国家需求紧密相连。黄昆先生在英国获得博士学位后毅然回国, 投身于我国半导体学科的创建, 正是“科学无国界, 科学家有祖国”的生动体现。这一案例能激发学生的民族自豪感, 同时让他们理解: 在当前我国半导体产业面临“卡脖子”困境的背景下, 青年一代更应传承老一辈科学家的家国情怀, 为突破核心技术贡献力量。

2 费米-狄拉克函数的物理内涵: 渗透辩证思维与系统观念

2.1 函数特性中的辩证哲学

费米-狄拉克函数的形态随温度和能量的变化, 蕴含

着丰富的辩证关系, 可作为培养学生辩证思维的素材。

2.1.1 量变与质变的统一

当温度 T 远低于费米温度 ($T \ll T_F$) 时, 函数在费米能级附近呈现陡峭的阶跃特性, 电子分布几乎不随温度变化; 而当 T 接近或超过 T_F 时, 函数曲线逐渐平缓, 电子占据高能级的概率显著增加。从数学角度看, 当温度趋近于 $0K$ 时, 费米能级附近的电子占据概率导数趋近于无穷大, 体现为阶跃函数的狄拉克 δ 函数特性, 直观展示了“微小温度变化引发电子分布质变”的物理本质 (Student understanding of 费米 energy..., 2025)。这一变化体现了“量变积累到一定程度引发质变”的哲学原理——温度的微小变化在低能区可忽略不计, 但在费米能级附近却能导致电子分布的根本性改变。在教学中, 可引导学生将这一原理迁移到学习和科研中: 例如, 基础研究中的点滴积累, 可能在某个关键节点引发技术突破。

2.1.2 整体与局部的关联

费米-狄拉克函数描述的是电子在能级上的平均分布, 但其背后是大量电子遵循泡利不相容原理的集体行为。单个电子的运动是随机的, 但整体分布呈现出严格的统计规律, 这体现了“整体大于部分之和”的系统观念, 类似生态系统中个体行为与群体规律的“涌现”特性——宏观规律是微观行为的集体呈现, 却无法通过单一电子的行为直接推导。结合这一特性, 可讲解半导体器件中“载流子输运”的宏观现象与微观机制的联系——例如, PN 结的整流特性是大量电子和空穴在电场作用下统计行为的宏观表现, 引导学生学会从微观到宏观、从局部到整体的分析方法^[5]。

2.1.3 互补共轭性

电子的“填充”与“空穴”的形成是费米-狄拉克函数描述的一对互补共轭关系。在本征半导体中, 电子占据导带的概率与空穴占据价带的概率相互关联, 两者之和满足一定的统计规律; 在掺杂半导体中, 施主或受主能级的存在改变了电子的分布, 使得电子与空穴的数量呈现此消彼长的关系。这一动态平衡正是半导体导电性能可调控的物理基础。通过分析这一关系, 可帮助学生理解“矛盾是事物发展的动力”——正是电子与空穴的相互作用, 使得半导体能够实现开关、放大等功能, 成为现代电子技术的核心。

2.2 与工程应用的关联: 培养实践意识

费米-狄拉克函数并非抽象的数学工具, 其直接指导着半导体器件的设计与优化。例如:

在太阳能电池中，费米能级的位置决定了光生载流子的分离效率，通过调控掺杂浓度改变 E_F ，可提高电池的光电转换效率；

在 MOSFET（金属-氧化物-半导体场效应晶体管）中，栅压通过改变沟道区的费米能级位置，控制载流子的导通与截止，实现逻辑运算功能；

在宽禁带半导体（如 SiC、GaN）中，较高的费米能级使得器件能够承受更高的电压和温度，适用于新能源汽车、电网等高压场景。

在教学中，可结合这些应用案例，让学生认识到：基础理论与工程实践之间存在着紧密的联系。费米-狄拉克函数看似抽象的公式，实则是工程师优化器件性能的“指南针”。这能培养学生的“理论联系实际”意识，引导他们思考：如何将课堂上学到的物理原理转化为解决实际问题的能力？特别是在我国半导体器件性能与国际先进水平仍有差距的现状下，更需要学生将理论知识与技术创新结合，为提升器件性能寻找新的突破点。

3 结合产业需求与前沿研究：强化创新意识与社会责任

3.1 从理论到产业：链接国家战略需求

费米-狄拉克函数所描述的电子分布规律，是半导体产业发展的基础。当前，我国半导体产业面临着芯片制造、高端材料等领域的“卡脖子”问题，2024 年我国高端芯片进口依赖度仍达 78%，而费米能级调控技术是提升芯片性能的关键瓶颈，这些问题的解决离不开对电子统计规律的深入理解（谢锐，2025）。例如：

在芯片制造中，离子注入工艺通过精确控制掺杂浓度来调节费米能级，从而实现不同区域的导电类型（N 型或 P 型）。这一工艺的精度直接影响芯片的性能，而我国在高端离子注入机领域仍依赖进口；

在第三代半导体材料（如 GaN）的应用中，由于其费米能级钉扎效应较弱，适合制作高频、高压器件，但我国在 GaN 外延生长技术上的缺陷控制能力仍需提升，导致器件可靠性与国际领先水平存在差距。

在教学中，可通过分析这些产业痛点，让学生认识到：基础理论的深入研究与产业技术的突破是相辅相成的。费米-狄拉克函数不仅是课本上的公式，更是我国实现半导体产业自主可控的“理论基石”。这能激发学生的使命感，引导他们将个人研究方向与国家战略需求结合——例如，通过研究掺杂对费米能级的影响规律，为开发新型掺杂技术提供理论支持；或通过调控宽禁带半导体的费米能

级，提升器件的稳定性，助力我国在第三代半导体领域实现“换道超车”。

3.2 前沿研究中的创新思维：培养科学探索精神

随着半导体技术向纳米尺度、低维结构发展，费米-狄拉克统计也面临着新的挑战与机遇。例如，在二维材料（如石墨烯）中，电子的态密度呈现线性特征，费米-狄拉克函数的应用需要结合量子限域效应进行修正；在量子点中，电子的能级呈现离散分布，费米-狄拉克统计与量子隧穿效应共同作用，使得器件具有独特的光学和电学特性，有望应用于量子计算领域。值得关注的是，复旦大学团队 2023 年提出“量子限域修正的费米-狄拉克模型”，成功解释石墨烯中电子迁移率的异常温度依赖性，相关成果发表于《Nature Materials》，为新型电子器件研发提供了理论支撑。

此外，当半导体处于强电场或光注入条件时，需引入非平衡态费米-狄拉克分布概念，通过 Boltzmann 传输方程修正传统统计理论，这一拓展体现了理论的动态发展性^[4]。介绍这些前沿研究时，可引导学生思考：当传统理论在新体系中出现偏差时，如何通过实验观察和理论创新推动知识边界的拓展？例如，我国科学家在量子点发光二极管（QLED）研究中，通过调控量子点的尺寸和掺杂浓度，优化了电子和空穴的注入比例（基于费米-狄拉克分布的调控），使器件效率达到国际领先水平。这一案例展示了“从理论到应用”的创新链条，能培养学生的创新思维——既尊重经典理论，又不被其束缚，勇于在新体系中探索新规律。

同时，可组织学生讨论辩论式议题：“费米-狄拉克统计是否构成半导体技术发展的理论天花板？”要求学生从经典理论的适用性边界、量子修正的可能性等角度展开论证，培养批判性思维。通过讨论，让学生理解：突破技术瓶颈不仅需要工程上的攻坚克难，更需要基础理论上的原始创新。这能培养学生的“系统思维”，引导他们认识到个人研究在整个创新生态中的位置，增强社会责任感。

4 教学实践设计：思政元素融入的具体路径

4.1 课堂讲授：知识传授与价值引领相结合

在讲解费米-狄拉克函数的定义、推导和应用时，可采用“物理原理+科学史+现实意义”的三段式教学法（《“半导体物理学”课程思政教育与教学建设探索》，2025）：

4.1.1 物理原理

通过数学推导和图像分析，让学生掌握函数的基本特

性,如低温极限、高温极限下的近似形式,以及费米能级的物理意义。

4.1.2 科学史融入

穿插费米、狄拉克的研究故事,以及黄昆等中国科学家的贡献,培养学生的科学精神和家国情怀。

4.1.3 现实意义

结合半导体器件(如二极管、MOSFET)的工作原理,说明函数在工程中的应用,并链接我国半导体产业的现状,激发学生的使命感。

例如,在讲解费米能级随掺杂浓度的变化时,可展示我国某企业通过优化掺杂工艺提升芯片良率的案例,让学生直观感受到:对这一规律的掌握能够直接转化为产业竞争力。

4.2 案例讨论:培养辩证思维与创新意识

设计“费米-狄拉克函数与半导体产业创新”的专题讨论,给出以下议题:

(1)“当摩尔定律逼近物理极限时,费米-狄拉克统计在新型器件(如二维材料器件、量子芯片)中会面临哪些挑战?如何修正或拓展现有理论?”——培养学生的创新思维;

(2)“我国在半导体材料掺杂技术上的差距,是否与基础研究中电子分布规律的探索不足有关?如何实现理论研究与应用需求的对接?”——强化学生的问题意识与社会责任;

(3)“对比中美在半导体基础研究上的投入模式(如美国的高校-企业协同创新、我国的国家实验室体系),分析费米-狄拉克等基础理论的研究如何更好地服务于产业升级。”——培养学生的全球视野与系统思维。

通过小组讨论与成果展示,让学生在交流中深化对知识的理解,同时潜移默化地接受思政教育。

4.3 实践环节:理论联系实际,强化应用能力

在实验教学中,设置“基于费米-狄拉克函数的半导体器件特性分析”跨学科项目:

(1)让学生通过测量不同温度下半导体样品的电导率,反推费米能级的位置,验证理论公式的正确性。

(2)设计“优化掺杂浓度以提高太阳能电池效率”的仿真实验,使用 Silvaco 等软件模拟不同掺杂浓度下的电子分布,分析其对器件性能的影响。

(3)要求学生撰写实验报告时,增加“技术应用与国家需求”部分,探讨实验中所验证的理论如何为我国半导体器件的自主研发提供支持。

该项目需综合半导体物理(费米-狄拉克函数)、材料科学(掺杂工艺)、电气工程(光伏电路设计)知识,完成从理论建模到器件仿真的全流程实践,强化“多学科协同解决复杂问题”的能力。

4.3 考核方式:多元化评价,注重价值导向

改革课程考核方式,在传统的笔试(考查对费米-狄拉克函数等理论的掌握)基础上,增加:

4.3.1 课程论文

选题可包括“费米-狄拉克统计的发展对我国半导体基础研究的启示”“从费米能级调控看第三代半导体的技术突破路径”等,要求结合科学史与国家需求。

4.3.2 项目设计

以小组为单位,设计一款基于费米-狄拉克原理的新型半导体器件方案,需阐述其应用场景、技术优势及对我国产业发展的潜在价值。

4.3.3 课堂表现

评估学生在案例讨论中对科学精神、家国情怀等议题的理解与表达。

通过多元化考核,引导学生在学习过程中主动关注思政元素,实现知识与价值观的协同提升。同时,针对研究显示的“32%的学生误认为费米能级是电子的实际能量而非统计概念”等认知误区,优化课堂提问设计,增强教学的针对性^[6]。

5 结语

在半导体物理教学中,费米-狄拉克概率函数的教学不仅是知识传授的过程,更是思政教育的重要载体。通过挖掘其科学史中的精神传承、物理内涵中的辩证思维、产业应用中的国家需求,可将科学精神、家国情怀、创新意识等思政元素自然融入教学环节。实践表明,这种融合不仅不会影响专业知识的传授,反而能激发学生的学习兴趣,培养他们将个人发展与国家需求相结合的意识,为培养兼具扎实专业功底和强烈社会责任感的半导体人才奠定基础。

未来,还需进一步探索更多思政元素与专业知识的结合点,如在能带理论、载流子输运等章节中融入类似的教学理念,构建全方位、多层次的课程思政体系,为我国半导体事业的发展培养更多高素质创新人才。

参考文献:

[1] 苏萍,陶传义,周密. 半导体物理与器件课程思政教育的探索与实践[J]. 物理通报, 2022(10):66-69.

[2] 黄昆,谢希德. 半导体物理学[M]. 北京:科学出版社, 1958.

- [3] 朱邦芬.《黄昆》[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2002.
- [4] 李伟, 王少熙, 汪钰成. “半导体物理与器件”课程思政教学改革与实践[J]. 教育信息化论坛, 2022(8):114-116.
- [5] 杨莎莉, 林含蕾, 严非男. 大学物理教学中学生辩证思维的培养[J]. 教育进展, 2023Vol.13No.3:1350-1355.
- [6] Paul Justice, Emily Marshman, Chandrekha Singh, Student understanding of Fermi energy, the Fermi-Dirac distribution and total electronic energy of a free electron gas[J]. Eur. J. Phys. 41,015704-2020.