

《短波长光源及应用》思政教学案例

——以自由电子激光光源为例

崔怀愈 董志伟 赵永蓬 朱成禹 何伟明

哈尔滨工业大学

DOI:10.12238/er.v8i8.6294

[摘要] “短波长光源及应用”课程为物理电子学学科的硕士选修课。该课程的思政体系主要内容拟采用从“仪器到人”、从“成果到思想”的逻辑关系,为学生展示我国在短波领域所构建的宏伟蓝图,引导学生形成正确的马克思主义科学技术观。

[关键词] 《短波长光源及应用》;思政教学;自由电子激光光源

中图分类号: G641 文献标识码: A

Case Study of Ideological and Political Education on Short Wavelength Radiation Source and its Application

——Taking Free Electron Laser Source as an Example

Huaiyu Cui, Zhiwei Dong, Yongpeng Zhao, Chengyu Zhu, Weiming He

Harbin Institute of Technology

Abstract: The course "Short wavelength radiation source and its Application" is an elective course for graduate students in Physical Electronics. The main content of the ideological and political education system in the curriculum is planned to adopt a logical relationship from "instruments to people" and from "achievements to ideas", to show the blueprint constructed by China in short-wavelength field and to guide students to form a correct Marxist scientific and technological view.

Keywords: "Short wavelength radiation source and its application"; Ideological and political education; Free electron lasers

1 自由电子激光光源思政案例(1学时)

本节课紧接着“同步辐射光源”之后。做这种课程内容的设计因为本节课与“同步辐射光源”内容连接十分紧密。自由电子激光是由同步辐射中“波荡器”^[1]所衍生出的一种亮度极高且相干性极好的波长可调谐激光光源。当波荡器逐渐加长,波荡器辐射光对电子束逐渐产生调制作用,将空间随机电子束调制为相干电子束,使波荡器辐射光的特性逐渐从部分相干转化为相干性极好的激光光源。这一过程充分体现出了光学领域的“量变引起质变”过程。

上课时首先复习上节课内容,引出自由电子激光^[2]产生机制,分析从波荡器辐射转化为自由电子激光辐射过程中电子运动状态的变化。接下来对近年来我国在自由电子激光小型化方面所取得的突出成就进行介绍,向学生展现我国在小型化自由电子激光领域所展现的科技实力以及无数科学家们对真知坚持不懈的追求,培养学生的科技民族自豪感和追求真理、严谨求是的科学观。

2 教学设计内容

2.1 AI 教学手段赋能预习环节

AI 技术赋能教学活动是目前教学领域被热烈讨论的话题和被教师们踊跃尝试的教学革新。专门用于教学的开源或商业化 AI 教学平台、软件近年来层出不穷。针对本门课程的课程内容、学生情况等,选择了一款商业化 AI 教学平台进行课程赋能。平台主要功能包括知识图谱搭建、课代表培训和应用、备课资料快速获取等,对于教师端和学生端都有较好的课程辅助作用。

在课程开始前,通过 AI 教学平台发布“自由电子激光”相关知识点和学习资料,以及近年来在 Nature 等顶级期刊发表的相关文章。学生还可在平台上自行利用 AI 快速寻找相关资料,扩大学习范围。另外,在平台上设置了教学助手小 EX,向小 EX 输入课程相关资料对其进行训练,帮助学生预习相关教学内容。

2.2 教学内容

1 学时(50 分钟)内容共分三个节拍进行。

第一节拍:(5 分钟)

复习同步辐射光源中三种插入件产生光辐射的机理及输出特性。着重强调其中“波荡器”辐射的特点及机理,引

出本节课自由电子激光的内容。其中波荡器辐射的波长表达式如下所示:

$$\lambda = \frac{\lambda_{\mu}}{2\gamma^2} (1 + \gamma^2 \theta^2) \quad (1)$$

其中, λ_{μ} 为波荡器磁铁结构周期, γ 为洛伦兹因子, θ 为测量仪器与波荡器中心轴的夹角。从表达式中可以看出波荡器辐射光的波长受波荡器的磁铁结构周期影响, 并且由于多普勒效应的影响, 轴上测得的波长最短, 轴外测得的波长则随 θ 的增加而增加。通过复习上述内容帮助学生回忆波荡器辐射的相关知识, 方便引入接下来的自由电子激光介绍。

本节拍思政元素挖掘: 从同步辐射波荡器中衍生出了新的光源产生机制, 强调“量变引起质变”过程, 反映出物理学的奇妙和广阔的研究空间。

第二节拍: (30分钟)

首先, 从描述波荡器辐射的公式入手, 引导学生思考, 如果波荡器的长度无限长, 那么电子在波荡器所提供的周期振荡的磁场中行进过程中, 除了受到磁场的洛伦兹力以外, 还会受到什么力? (答案为: 会受到波荡器辐射累计的光能对电子的调制力作用。)给出如下公式(2), 对比与上堂课所学的波荡器辐射公式的区别, 强调其中 $\frac{K^2}{2}$ 磁调控项对光输出的影响。(5分钟)

$$\lambda = \frac{\lambda_{\mu}}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} + \gamma^2 \theta^2 \right) \quad (2)$$

接下来分析自由电子激光与波荡器辐射最本质的区别, 即辐射光对电子束的调制作用。点出关键是将随机的电子束调制成微束团。从宏观看, 这是一种电子与光场之间的能量交换。从微观看, 先对电子在x方向的速度 v_x 进行推导, 电子在波荡器中的运动方程如公式(3)所示。

$$\frac{dp}{dt} = -e(v \times B) \quad (3)$$

将矢量转化为标量, 如公式(4)所示。

$$\begin{aligned} m\gamma \frac{dv_x}{dt} &= ev_z B_y \\ m\gamma \frac{dv_x}{dt} &= -e \frac{dz}{dt} B_0 \sin\left(\frac{2\pi z}{\lambda_{\mu}}\right) \\ m\gamma dv_x &= -edz B_0 \sin\left(\frac{2\pi z}{\lambda_{\mu}}\right) \\ m\gamma v_x &= \frac{eB_0 \lambda_{\mu}}{2\pi} \cos\left(\frac{2\pi z}{\lambda_{\mu}}\right) \\ \text{令 } K &\equiv \frac{eB_0 \lambda_{\mu}}{2\pi mc}, \\ \text{则 } v_x &= \frac{Kc}{\gamma} \cos\left(\frac{2\pi z}{\lambda_{\mu}}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

由结果看出, 电子在x方向的速度表达式是振荡型。注意这一表达式中没有辐射光场的参与, 是波荡器辐射条件下的表达式。下一步以电子的功率作为桥梁建立电子和辐射光场之间的耦合关系, 如公式(5)所示。

$$\frac{dE_e}{dt} = \mathbf{v} \cdot \mathbf{F} \quad (5)$$

其中等式左边为电子能量随时间的变化, 右侧为源于洛伦兹力的功率。从而我们可以得到公式(6)的关系。

$$mc^2 \frac{d\gamma}{dt} = -eE_x v_x \quad (6)$$

其中 E_x 为辐射光场的x轴电场分量。从公式(6)可以看出, 电子和辐射光场之间的能量交换情况。这个能量的交换依赖于辐射光场的电场相位以及电子在磁场中的位置(由 v_x 决定)。因此, 一部分电子得到能量, 另一部分电子失去能量。这种交换体现在电子的速度改变上。也就是说, 电子的能量依赖于它在光场中相位的位置。这使得电子在空间上的相对位置改变, 形成微聚束。由此可以看出, 只有当波荡器足够长时, 才能体现出光场对电子束的调制作用。微聚束形成后, 同一相位的电子数密度增多, 导致辐射场强随着同一状态下电子束密度增大而增大, 对应产生的光强呈指数倍增大。同时, 相干性具有极大的提升。在讲授上述内容时, 重点注意将各个公式的物理含义讲述清楚, 帮助学生理解抽象的物理机理。

对学生进行分析: 选择该课程的学生绝大部分本科学习过《激光原理》, 了解经典激光器的工作原理以及激光的产生机制方面的知识。而自由电子激光器的工作原理与经典激

光器的工作原理是截然不同的。在上述讲授自由电子激光器的工作原理之后有必要与经典激光器的工作原理进行对比, 开发学生的批判性思维和思辨能力。

本节拍思政元素挖掘: 1976年自由电子激光的产生机制就被 J. M. Madey 博士所计算和预测, 并根据他的研究成功研制出自由电子激光。但这种激光调制电子束的微过程在 2021 年才在我国上海 SXFEL 光源上成功观测。这反映出短波领域绵长的研究周期和极大的难度挑战。同时也说明了科学家们对真知的不懈追求, 即使已证明自由电子激光的机制可行的情况下, 仍然坚持数十年的研究直到在实验中测量到真正的微观现象。

第三节拍: (15 分钟)

自由电子激光器之所以体积庞大, 主要原因是为获得相对论电子, 直线加速部分的轨道被延长至几公里。因此, 为将自由电子激光小型化, 需提出一种能够大幅提升电子加速梯度的方法, 缩短将电子加速至相对论电子的距离。由此引出激光尾波场加速的方法。为帮助学生更加具体的理解电子在激光尾波场中加速, 用冲浪者借助汽艇尾部马达产生的波浪加速的场景作为这一过程的比喻。激光尾波场加速的方式由于大幅缩短了电子加速的距离, 因此理论上能够将几公里长的自由电子激光缩短至米级。但这种方式的一大挑战就是待加速电子注入的条件。激光尾波场形成的时间与待加速电子注入的时间完美匹配才能够实现电子的高梯度加速, 极大的考验了科研工作者对微观世界的调控能力。

本节拍思政元素挖掘: 2004 年, 由美国、英国和法国共同发表了《nature》的封面文章, 报道了在实验上首次获得基于激光尾波场加速的百 MeV 的电子束, 并起名为“梦之束”, 以此代表了激光尾波场加速实现小型化自由电子激光的开端。之后几次里程碑式的报道都是美国发表的, 并且再没登上《nature》封面。直至 2021 年, 由我国上光所王文涛团队在实验上利用激光尾波场加速获得的 492MeV 电子束产生了 150nJ 极紫外激光输出, 时隔 17 年文章再次登上 nature 封面。这是振奋人心的一则消息, 是国际上首次真正意义上实现了基于激光尾波场加速的自由电子激光输出。激光器全长 12m, 比传统的自由电子激光器长度降低了几百倍。这一创新性的成果充分反映了我国在短波领域已展现出国际领先的技术优势。

2.3 教学反思

在这部分教学内容中主要有两个难点。一是如何把学生对待激光器的思维从经典激光器中引导出来。课程需让学生认识到极紫外和 X 射线激光器无论从工作原理还是光的输出特性来说都是全新的知识和全新的领域, 在经典激光器中约定俗成的一些规律和概念, 在这里都不适用, 甚至连最经

典的激光产生三要素在短波领域都不需要。学生由于多年的专业课学习, 已经形成了一些思维定势, 要在短时间内把学生的思维扭转过来并快速吸收理解短波领域的新知识, 对教学内容和教学方法提出了更高的要求。在之后的教学活动中, 应关注如何快速改变学生的思维定式, 更多展示短波领域自由电子激光器与经典激光器的本质区别, 帮助学生快速理解。

二是如何将思政内容“丝滑”的融入教学活动中, 避免“捧高踩低”^[3]。讲授思政内容的其中一个目的是彰显我国的科技实力, 扭转学生“花是外国的香”的思维定式。但需注意在讲授过程中要保持对科技成果和案例评价的中立性和真实性, 在客观表述的前提下, 展示我国科学家们对该领域的卓越贡献和艰苦卓绝的科学精神。如何把握好平衡点, 是一个挑战。这更多的考验了教师对思政内容深层次的理解以及辩证看待事物的能力。同时, 这也是提升课堂质量的一个着力点。将这一环节攻克, 整个教学活动将提升一个新的层次。

3 总结

在教学中激发学生的爱国之情, 培养学生正确的马克思主义科学观, 是高等教育发展的永恒主题。《短波长光源及应用》以“自由电子激光光源”内容为代表, 通过教学内容的设计, 注重对学生思维的引导, 使学生不仅能掌握关于课程内容的核心部分, 更能在开阔视野、接触国际前沿方向的同时进一步提升自己的专业素养和个人能力。因此, 课程开设至今选课人数可观, 广受同学们的喜爱与好评。

本课程后续也会继续跟进优化, 实时更新相关领域的前沿资讯, 深入挖掘思政元素, 听取学生和学校的反馈, 思考如何进一步对教学内容与模式进行创新设计。

[参考文献]

[1] 唐鄂生, 朱佩平, 崔明启. 同步辐射的相干模式[J]. 光学学报, 1988, 18(12): 1640.

[2] 赵振堂, 王东, 殷立新, 等. 上海软 X 射线自由电子激光装置[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 4.

[3] 程慧. 红色文化融入高校“大思政课”建设路径研究[J]. 佳木斯职业学院学报, 2024, 41(5): 34-36.

作者简介:

崔怀愈 (1988.05-), 女, 汉族, 哈尔滨人, 博士研究生, 副教授, 研究方向为极紫外激光及应用。

基金项目:

本工作由哈尔滨工业大学第十一批研究生课程思政教育教学改革项目 (XYSZ2023004) 和 2024 年“双一流”建设经费双一流人才培养成果提升计划 (研究生教育)《《短波长光源及应用》硕士生精品专业课程建设》支持。