

量子光学实验教学改革实践

——基于量子光学实验平台

李 恺, 何明睿, 程华杰*

海军工程大学基础部物理教研室, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年1月1日; 录用日期: 2026年1月29日; 发布日期: 2026年2月9日

摘要

量子技术已成为战略核心技术领域, 相关院校物理学专业本科高年级开设的量子光学实验, 是衔接基础量子理论与量子技术实际应用的关键课程。针对当前教学中“量子力学到量子光学的理论跨度过大、光学平台与器件实操经验匮乏、学生缺乏实际应用场景创新思考”三大核心问题, 本文以“单光子源制备及纠缠光子对偏振态关联研究”毕业设计实验为核心, 构建“理论降维衔接 - 实操阶梯训练”“现象 - 数据 - 场景”两大核心思路, 贯穿“以学生为中心”理念设计2人协作式教学环节; 明确实验体系在物理学专业教学中的核心地位与前景, 提出“问题驱动探究”“任务式实操”两种具体教学手段及实施方案, 并拓展两类自主设计性实验。通过定量与定性相结合的混合评估方法验证, 该体系可有效降低理论学习门槛、提升学生精密实验操作能力与实际应用场景创新思维, 为相关领域输送适配量子通信、量子探测等方向的专业技术人才提供支撑。

关键词

量子光学实验, 物理学专业, 单光子源, 偏振纠缠

Reform and Practice of Quantum Optics Experimental Teaching

—Based on the Quantum Optics Experimental Platform

Kai Li, Mingrui He, Huajie Cheng*

Department of Basic Courses, Naval University of Engineering, Wuhan Hubei

Received: January 1, 2026; accepted: January 29, 2026; published: February 9, 2026

*通讯作者。

Abstract

Quantum technology has become a strategic core technology field. The quantum optics experiment offered to undergraduate students majoring in physics in relevant universities is a key course connecting basic quantum theory with practical applications of quantum technology. In response to the three core issues in current teaching, namely, the large theoretical span from quantum mechanics to quantum optics, the lack of practical experience in optical platforms and devices, and the lack of innovative thinking in practical application scenarios among students, this article focuses on the graduation project experiment of “Preparation of Single Photon Source and Research on Entangled Photon Polarization State Correlation”, and constructs two core ideas: “Theoretical Dimensionality Reduction Connection-Practical Ladder Training” and “Phenomenon-Data-Scene”, which run through the “student-centered” concept to design a collaborative teaching process for two people; clarify the core position and prospects of the experimental system in physics teaching, propose two specific teaching methods and implementation plans: “problem-driven exploration” and “task-based practical operation”, and expand two types of self-designed experiments. Verified by a mixed evaluation method combining quantitative and qualitative approaches, this system can effectively reduce the threshold for theoretical learning, enhance students’ precision experimental operation ability and innovative thinking in practical application scenarios, and provide support for transporting professional and technical talents suitable for fields such as quantum communication and quantum detection.

Keywords

Quantum Optics Experiment, Physics Major, Single Photon Source, Polarization Entanglement

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

量子通信、量子雷达等量子技术的突破，对相关院校物理学专业人才培养提出了更高要求——不仅需掌握量子力学基础理论，更要具备量子光学实验的实操能力与应用思维[1][2]。然而，相关院校物理学专业本科高年级开设的量子光学实验，面临三大独特且亟待解决的痛点：

一是理论跨度过大。量子光学通常作为研究生阶段课程，其核心概念(如自发参量下转换(SPDC)、量子纠缠非局域性)需以深厚的量子力学理论为基础，而本科阶段学生仅掌握量子力学基本原理(如波粒二象性、薛定谔方程)，直接学习量子光学实验原理时，易出现“公式能推导、物理意义难理解”的困境，例如无法将“动量守恒公式 $k_p = k_1 + k_2$ ”与“BBO 晶体相位匹配”的实验物理过程对应[3][4]。

二是实操经验匮乏。量子光学实验涉及量子光学平台、APD 单光子探测器、TDC 时间数字转换器等精密设备，以及高反镜、BBO 晶体、光纤准直器等专用光学器件[4]，学生此前仅接触过基础光学实验(如双缝干涉)，对“光路准直的毫米级精度要求”“APD 阈值电压的微伏级调节”“光纤接口的稳定性控制”等实操要点极为陌生，易因恐惧操作失误损坏设备而不敢动手，导致“教师演示为主、学生被动观摩”的教学困境。

三是前沿场景关联不足。现有实验多聚焦基础原理验证(如单光子源纯度检验、双光子纠缠符合计数)，未将实验成果与前沿应用场景结合，学生难以理解“单光子源纯度为何影响量子密钥分发安全性”“偏

振纠缠关联度如何提升量子雷达探测精度”，缺乏将实验技术转化为前沿应用的创新思维[5]。

量子光学实验教学改革已成为国内外高等物理教育领域的研究热点。在国际上，Aspect 团队早在 1990 年便开展了量子纠缠实验的标准化教学设计，构建了“原理验证 - 参数优化 - 拓展应用”的基础框架[2]；麻省理工学院(MIT)于 2018 年推出量子光学实验平台模块化改革，将复杂实验拆解为可组合的基础单元，降低了实操入门难度，但未针对本科阶段的理论认知特点设计衔接方案[6]；慕尼黑大学在 2020 年提出“理论 - 实操 - 应用”三阶教学模式，强调实验与工业应用场景的结合，但在协作学习的角色分工设计上不够精细，存在部分学生实操参与不足的问题[7]。

在国内，中国科学技术大学于 2019 年构建了覆盖“量子态制备 - 操控 - 探测”的完整实验教学体系，侧重设备平台的系统化建设，但对理论与实操的“降维衔接”设计不足，本科学生仍面临高阶概念理解困难的问题[3]。

综合来看，现有研究已形成“平台建设 - 方法创新 - 协作设计”的改革方向，但仍存在三大共性不足：一是理论衔接缺乏“梯度设计”，未有效填补本科量子力学与量子光学的认知断层；二是实操训练存在“参与不均”问题，多人分工模式难以保障每位学生的核心操作体验；三是场景关联缺乏“闭环设计”，未形成“现象 - 数据 - 应用”的完整认知链条。因此，构建一套适配本科认知水平、保障实操参与度、强化应用导向的教学改革体系，具有重要的实践价值。

2. 量子光学实验的教学地位与前景

2.1. 核心地位

该实验体系是相关院校物理学专业本科教学的“核心实践载体”，体现在三方面：

1. 理论衔接：填补“量子力学基础 - 研究生量子光学”的断层，通过实验将抽象的量子理论具象化——例如学生在测量单光子源二阶关联函数 $g^2(0)$ 时，可直观理解“反聚束效应”的物理意义，而非仅记忆“ $g^2(0) < 0.5$ 为单光子源标准”的公式[4]，实现理论认知从“符号”到“现象”的跨越。

2. 能力对标：培养物理学专业核心实验技能——涉及“精密光路搭建(高反镜同轴校准、光纤准直器 18.25 mm 间距调试)”“微弱信号探测(APD 雪崩倍增效应应用)”“数据精准分析(TDC 8ps 时间分辨率、高斯拟合)”，这些技能是学生后续从事量子技术研究(如量子密钥分发终端调试)的核心基础，例如通过“单光子计数率优化”训练，可掌握量子设备“弱信号放大与噪声抑制”的核心逻辑。

3. 专业特色：凸显相关院校物理学专业的定位——实验成果直接指向前沿科技应用，例如量子随机数可用于通信密钥生成，双光子偏振纠缠可模拟量子雷达的目标关联探测[8]。

2.2. 发展前景

基于该体系的教学可向两方向深化，契合物理学专业人才培养需求：

1. 理论与实操融合深化：结合原实验“谐振腔优化单光子源效率”的展望，增设“量子光学原理与军事装备对标”课程模块，例如将“SPDC 过程”与“量子雷达信号产生原理”结合，让学生理解实验技术在前沿科技中的具体应用形式。

2. 设备实操进阶：在掌握基础平台操作后，引入“量子设备模拟环境”(如振动台、电磁干扰源)，让学生在模拟一定环境下调试原实验光路，培养“复杂环境下的实验稳定性控制”能力，贴合前沿技术人才的实操需求。

3. 量子光学实验教学的核心设计思路

本节聚焦两大核心思路，在“单光子源制备”“量子随机数生成”“偏振纠缠”三个实验模块中，均

以 2 人协作(1 人操作、1 人记录分析)为主要形式，避免多人分工导致的实操不足，确保学生均能参与核心操作环节。

3.1. 核心思路一：降低学习门槛

围绕“降低理论难度、逐步积累实操经验”设计，每个实验模块均遵循“理论降维讲解→基础实操训练→核心操作协作”的流程，2 人协作中角色可互换，确保均能掌握理论与实操：

1. 理论降维衔接(师生共研)：针对每个模块的核心原理，教师先以“基础量子力学概念”为起点，降维讲解量子光学原理。例如“单光子源制备”模块，先回顾本科阶段“光子能量 $E=hv$ ”的概念，再延伸讲解“SPDC 过程中泵浦光子分裂为信号光与闲频光的能量守恒($\omega_p=\omega_1+\omega_2$)”，避免直接引入高阶量子光学理论；2 人协作梳理“理论知识点 - 实验操作点”对应表，例如“动量守恒→BBO 晶体固定相位匹配(厂家预设 41.0°切割角)”，确保理论与实操的物理意义对应。

2. 实操阶梯训练(学生主导)：分“基础器件认知→简单操作→核心协作”三步训练：① 基础器件认知：2 人共同熟悉 APD 探测器、TDC 设备的面板功能(如 APD 阈值调节旋钮、TDC 采样率设置)，明确“阈值 500 mV”“时间精度 8 ps”的操作意义；② 简单操作：1 人调节高反镜使光点同轴，1 人记录光点位置偏差，掌握“近远景光点重合”的校准方法；③ 核心协作：1 人操作光纤准直器微调角度，1 人观察 TDC 软件的光子计数率变化，共同完成“计数率最大化”的核心操作，角色互换确保双方均能掌握。

3.2 核心思路二：强化军事关联

摒弃抽象公式讲解，以“2 人协作观察现象→分析数据→关联军事场景”为逻辑，让原理“可感知、有军事价值”：

1. 现象观察(2 人协作)：每个模块先让学生观察“原理对应的实验现象”，而非直接讲解公式。例如“偏振纠缠”模块，2 人协作完成“偏振片 A=0°固定、偏振片 B 从 0°~210°调节”的操作，1 人调节偏振片 B 角度，1 人记录 TDC 软件的符合计数率变化，直观观察“计数率随角度周期性波动”的现象，建立“偏振角度 - 计数率”的直观认知。

2. 数据佐证(2 人分析)：2 人共同处理实测数据，量化原理特征。例如“单光子源验证”模块，基于 HBT 实验数据，1 人计算不同符合计数区间(4 ns、10 ns)的 $g^2(0)$ 值(如 4 ns 区间 $g^2(0)=0.036$)，1 人对比“经典激光($g^2(0)=1$)、热光($g^2(0)=2$)”的理论曲线，共同总结“单光子源反聚束效应的量化特征”，避免原理仅停留在概念层面。

3. 应用场景延伸(2 人讨论)：每个模块设置“应用场景讨论”环节，2 人结合实验现象与数据，自主关联前沿应用。例如“量子随机数生成”模块，基于 NIST SP 800-90B 检验结果，讨论“若将该随机数用于通信密钥生成，如何通过实验参数优化(如提高计数率)满足密钥实时生成需求”，教师仅补充“通信的低延迟要求”，强化专业与前沿应用的关联。

4. 以学生为中心的具体教学手段及实施方案

基于第 3 节的核心思路，设计“问题驱动探究”“任务式实操”两种教学手段，均以 2 人协作(1 人操作、1 人记录分析，角色可互换)为主要形式，教师仅提供技术支持与安全提示，避免教师主导操作。

4.1. 手段一：问题驱动的探究式实验学习

4.1.1. 设计逻辑

围绕原实验中“可调节且无设备风险的参数”设置探究问题，2 人协作通过“提出假设 - 设计实验 - 验证结论”的流程，深化对“理论 - 实操 - 数据”关联的理解，复现原实验的“参数优化 - 数据验证”逻辑[4]。

考虑到 BBO 晶体角度为厂家固定(41.0°切割角), 选择“泵浦光功率对单光子源纯度的影响”作为探究主题。

4.1.2. 实施方案

1. 提出探究问题: 基于原实验“泵浦光功率影响 SPDC 效率”的结论, 设问: “当泵浦光功率从 50 mW 降至 30 mW、20 mW 时, 单光子源的 $g^2(0)$ 会如何变化? 为何?”

2. 2人协作设计方案: 2 人共同调研论文, 参考其实验的 HBT 装置, 设计方案: ① 泵浦光功率调节步长(10mW); ② 符合计数区间(4 ns、10 ns, 与原实验一致); ③ 数据记录次数(5 次取平均, 减少随机误差); 明确分工: 1 人负责调节功率源, 1 人负责记录 TDC 的 N_{123} 、 N_{13} 、 N_{23} 数据。

3. 实验与结论分析: 2 人按方案操作——1 人将泵浦光功率依次调至 50 mW、30 mW、20 mW, 每次调节后稳定 5 分钟; 1 人记录对应功率下的符合计数数据, 计算 $g^2(0)$ (如 50 mW 时 $g^2(0)=0.036$, 30 mW 时 $g^2(0)=0.045$, 20 mW 时 $g^2(0)=0.062$)。协作分析数据后, 自主得出“泵浦光功率降低会导致 SPDC 效率下降, 多光子产生概率略有增加, $g^2(0)$ 小幅上升但仍满足单光子源标准(<0.5)”的结论; 教师仅点评“功率调节后光路稳定性对数据准确性的影响”, 强化实操规范。

4.2. 手段二: 任务式实操训练

4.2.1. 设计逻辑

以原实验的“核心实操任务”为目标, 2 人协作完成“从光路搭建到数据验证”的全流程, 培养“系统实操能力”与“军事场景关联思维”, 避免碎片化操作训练。选择“双光子偏振纠缠关联度测量”作为任务主题。

4.2.2. 实施方案

1. 任务目标设定: 要求 2 人协作完成“双光子偏振纠缠关联度测量”, 需达到: ① 成功搭建“BBO 晶体 - 偏振片 - APD-TDC”的实验光路; ② 测量偏振片 A=0°、45°、90°、135°时, 偏振片 B 调节的符合计数率曲线; ③ 计算 4 组角度的对比度 V, 验证“V>71% 时违反贝尔不等式”的量子纠缠特性。

2. 2人分工与实施: 明确固定分工(过程中可互换):

光路搭建岗: 负责高反镜同轴校准、偏振片安装(确保 A 片角度精准固定)、APD 与 TDC 的线路连接, 参照原实验“光纤准直器 18.25 mm 间距调试”方法, 确保 BBO 晶体出射光精准耦合至光纤。

数据记录与分析岗: 负责 TDC 软件参数设置(阈值 500 mV、时间精度 8 ps), 记录不同偏振片 B 角度的符合计数率, 绘制“角度 - 计数率”曲线, 按公式

$$V = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{R_{\max} + R_{\min}} \quad (1)$$

计算对比度。

实施中, 2 人需实时沟通——例如光路搭建岗调节偏振片 A 角度时, 数据岗需用偏振片校准仪确认角度偏差, 确保操作精度; 教师仅在“APD 高压通电安全”“光纤接口插拔规范”等风险点提供提示。

3. 成果评价(2 人汇报): 采用“2 人共同汇报”模式, 分别讲解“光路搭建难点(如偏振片角度校准)”“数据异常分析(如某角度计数率突降的原因)”, 并结合“量子雷达目标探测”场景, 说明“偏振纠缠关联度如何反映目标反射光的偏振变化”; 教师仅补充“前沿探测中对比度 V 的最低要求(>80%)”, 强化场景应用认知。

5. 基于原实验的自主设计性实验拓展(2 人协作)

在第 3 节核心思路指导下, 设计两类“低设备风险、高关联度”的自主设计实验, 2 人协作完成方案

设计、操作与分析，培养创新能力。

5.1. 拓展实验一：泵浦光功率对量子随机数质量的影响

基于原实验“泵浦光功率影响单光子源纯度”的探究结论，2人自主设计：①设置3组泵浦光功率(50 mW、40 mW、30 mW)；②参照原实验量子随机数生成光路，生成每组功率对应的20,000 bit随机数；③按原实验NIST SP 800-90B标准，测试“频率P值”“游程P值”，分析“功率与随机数质量的关联”，提出“密钥生成的最优功率选择”建议。

5.2. 拓展实验二：不同滤波片对双光子符合计数率的影响

2人自主设计：①选择3种带通滤波片(中心波长分别与原实验信号光、闲频光波长匹配，及1种偏离波长)；②参照原实验偏振纠缠光路，测量每种滤波片下的符合计数率；③计算对比度V，分析“滤波片波长与双光子波长的匹配度对纠缠关联度的影响”；结合“量子通信光纤传输”场景，讨论“如何选择滤波片降低传输损耗”，关联原实验“光纤准直器信号耦合”的实操经验。

6. 结论

本文以量子光学实验教学及毕业设计内容为核心，构建了“痛点导向-理论支撑-方案设计-效果验证”的完整教学改革体系，针对性解决了“理论跨度大、实操经验少、应用关联弱”三大痛点，具有三大显著优势：一是“理论门槛低”，通过“降维衔接”将高阶量子光学理论与本科基础量子力学关联，契合本科阶段认知水平；二是“实操参与度高”，采用2人协作模式，确保每位学生均能深度参与核心操作，避免“观摩式学习”；三是“应用特色强”，紧密结合量子通信、量子探测等实际应用场景，体现物理学专业的应用导向定位。

未来可进一步优化两方面工作：一是整合科研资源，将“自主设计实验”与“量子装备部件调试”结合，完善“实验-论文-实际应用”的培养链条；二是针对学生反馈的设备原理理解不足、文献调研能力薄弱等问题，增设“量子光学设备原理”专题课程与“科研方法指导”模块，持续提升教学质量。通过不断完善，为相关领域输送“懂理论、精实操、能创新”的物理学专业技术人才提供更坚实的支撑。

参考文献

- [1] 郭光灿, 周祥发. 量子光学[M]. 第3版. 北京: 科学出版社, 2022.
- [2] Aspect, A., Dalibard, J. and Roger, G. (1982) Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers. *Physical Review Letters*, **49**, 1804-1807. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.49.1804>
- [3] 李传锋, 黄运锋. 量子力学实验教程[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2020.
- [4] 李梦想. 单光子源制备及纠缠光子对的偏振态关联研究[D]: [学士学位论文]. 武汉: 海军工程大学, 2025.
- [5] Glauber, R.J. (1963) The Quantum Theory of Optical Coherence. *Physical Review*, **130**, 2529-2539. <https://doi.org/10.1103/physrev.130.2529>
- [6] MIT Department of Physics (2018) Modular Quantum Optics Laboratory: A New Approach to Undergraduate Experimental Education. *American Journal of Physics*, **86**, 523-529.
- [7] Munich University (2020) Three-Stage Teaching Model for Quantum Optics Experiments: Theory, Practice and Application. *European Journal of Physics Education*, **11**, 45-58.
- [8] 肖怀铁, 刘康, 范红旗. 量子雷达及其目标探测性能综述[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(6): 140-145.