

激光速率方程可视化教学

韩云鑫 刘 可 张栋文 张 森 刘永录 彭 刚

(国防科技大学理学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要 激光速率方程是描述激光产生过程中粒子数演化与光场相互作用的核心理论,但其抽象的数学形式和复杂的物理过程给教学带来诸多挑战。本文以四能级系统为研究对象,基于 Matlab 数值仿真技术构建激光速率方程可视化教学平台,系统阐述四能级速率方程与增益系数的理论,通过动态仿真分析泵浦功率、激光上能级寿命、激光输出镜反射率等关键参数对各能级粒子数密度、增益系数及输出光强的影响。教学实践表明,该可视化方法能将抽象理论具象化,帮助学生直观理解参数变化的物理意义,显著提升学习效果。

关键词 激光速率方程;四能级系统;增益系数;Matlab;可视化教学

DOI: 10.27024/j.wlygc.2025.08.02.01

VISUALIZED TEACHING OF LASER RATE EQUATIONS

HAN Yunxin LIU Ke ZHANG Dongwen ZHANG Sen LIU Yonglu PENG Gang

(School of Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073)

Abstract The laser rate equation is the core theory that describes the evolution of particle numbers and the interaction with the light field during the laser generation process. However, its abstract mathematical form and complex physical process pose many challenges for teaching. Taking the four-level system as the research object, this paper constructs a visual teaching platform for the laser rate equation based on Matlab numerical simulation technology. It systematically elaborates on the theory of the four-level rate equation and the gain coefficient. Through dynamic simulation, it analyzes the effects of key parameters such as pump power, upper laser level lifetime, and output mirror reflectivity on the particle number density of each level, the gain coefficient, and the output light intensity. Teaching practice shows that this visualization method can concretize the abstract theory, help students intuitively understand the physical meaning of parameter changes, and significantly improve learning outcomes.

Key words laser rate equation; four-level system; gain coefficient; Matlab; visual teaching

激光原理课程中,速率方程理论是解释粒子数反转、受激辐射及激光输出特性的核心工具,但由于涉及多能级粒子数耦合演化和复杂的数学推

导,学生往往难以建立直观认知。传统教学中,实物实验受限于设备成本高、操作复杂且参数可调范围有限等问题,无法全面展示各参数对激光特

收稿日期: 2025-08-02; 修回日期: 2025-12-09; 出版日期: 2026-03-30

基金项目: 湖南省普通高等学校教学改革研究项目(202502000009;202502000047;HNJG-20230040)。

通信作者: 韩云鑫, hanyx15@163.com。

引文格式: 韩云鑫,刘可,张栋文,等. 激光速率方程可视化教学[J]. 物理与工程, 2026, 36(2): 86-91, 100.

Cite this article: HAN Y X, LIU K, ZHANG D W, et al. Visualized teaching of laser rate equations[J]. Physics and Engineering, 2026, 36(2): 86-91, 100. (in Chinese)

性的影响;而静态公式推导又难以呈现动态物理过程,导致学生对“粒子数反转”“增益饱和”等概念理解片面。

Matlab 作为强大的数值计算与可视化工具,在激光原理教学中展现出显著优势:通过数值方法求解复杂速率方程,结合 GUI 界面实现参数实时调节与动态结果展示,使抽象理论转化为直观的视觉图像与动画^[1-7]。例如,蒋国保等通过 Matlab 仿真激光谐振腔光场分布,验证了虚拟仿真在提升学生兴趣和理解深度中的作用^[1];王晓峰等对三能级系统的速率方程进行了数值求解,清晰展示了激光器从泵浦到稳定输出的全过程^[6]。

本文基于四能级激光系统模型,利用 Matlab 的刚性微分方程求解器(ode15s)构建仿真平台,重点分析泵浦功率、上能级寿命、输出镜反射率等参数对各能级粒子数密度、增益系数及输出光强的影响,为激光速率方程教学提供直观、可交互的辅助工具。

1 理论基础

1.1 四能级系统速率方程

四能级系统是大多数激光器(如 Nd:YAG 激光器)的典型工作模式,其能级结构如图 1 所示。能级结构中包含基态能级 E_0 、激光下能级 E_1 、激光上能级 E_2 和泵浦能级 E_3 ,各能级粒子数密度分别用 N_0 、 N_1 、 N_2 、 N_3 描述。

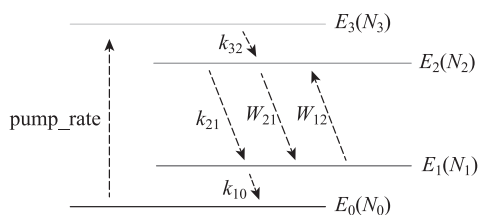


图 1 四能级系统示意图

图 1 中,pump_rate 为泵浦速率,表达式为

$$\text{pump_rate} = \sigma_{03} \times P/S \times N_0 / (E_3 - E_0) \quad (1)$$

表示单位时间内将能量通过泵浦源注入激光介质中,从基态激发到泵浦能级($E_0 \rightarrow E_3$)的粒子数密度,泵浦方式可以是:光注入、电注入、化学能注入等。式中, $\sigma_{03} = 6.6 \times 10^{-21} \text{ m}^2$ 、 $P/S = 3.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ 分别表示介质粒子的吸收截面、有效泵浦功率、有效泵浦面积,泵浦能级与基态能级

间能量差值 $E_3 - E_0 = 1.53 \text{ eV}$ 。

图 1 中, $k_{32} = 1 \times 10^9 \text{ Hz}$ 、 $k_{21} = 1/\tau_{21} = 1 \times 10^3 \text{ Hz}$ 、 $k_{10} = 1 \times 10^8 \text{ Hz}$ 分别表示单位时间内介质粒子从能级 $E_3 \rightarrow E_2$ 快速弛豫、 $E_2 \rightarrow E_1$ 自发辐射、 $E_1 \rightarrow E_0$ 无辐射跃迁概率,即介质粒子在 1 秒内发生能级跃迁的次数, τ_{21} 表示激光上能级寿命。 W_{12} 、 W_{21} 分别为受激吸收和受激辐射概率,即介质粒子在单位时间内发生能级跃迁,并吸收或辐射光子的次数。为方便描述,令 $N_2 W_{21} - N_1 W_{12} = k_{\text{rad}} \times (N_2 - N_1)$,其中 k_{rad} 表示修正的受激辐射系数,其表达式为

$$k_{\text{rad}} = \sigma_{21} \times c \times \text{Phi} \quad (2)$$

式中, $\sigma_{21} = 3 \times 10^{-23} \text{ m}^2$ 、 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 、 Phi 分别表示介质粒子的受激辐射截面、光速、腔内光子数密度。

根据介质粒子跃迁规律,其粒子数和光子数密度速率方程可表示为^[6,7]

$$dN_0/dt = -\text{pump_rate} + k_{10} \times N_1 \quad (3)$$

$$dN_3/dt = \text{pump_rate} - k_{32} \times N_3 \quad (4)$$

$$dN_2/dt = k_{32} \times N_3 - k_{\text{rad}} \times (N_2 - N_1) - k_{21} \times N_2 \quad (5)$$

$$dN_1/dt = k_{\text{rad}} \times (N_2 - N_1) + k_{21} \times N_2 - k_{10} \times N_1 \quad (6)$$

$$d\text{Phi}/dt = k_{\text{rad}} \times (N_2 - N_1) - \text{Phi}/\tau_l \quad (7)$$

其中, τ_l 表示腔内光子寿命。

1.2 激光增益

激光增益源于激光介质受激辐射对光场的放大作用,其表达式为^[6,7]

$$G = \sigma_{21} \times (N_2 - N_1) \quad (8)$$

其中, $N_2 - N_1$ 为反转粒子数密度。四能级系统的核心优势在于激光下能级 E_1 寿命极短($1 \times 10^{-8} \text{ s}$ 量级),例如 Nd:YAG 激光器约为 $3 \times 10^{-8} \text{ s}$ ^[8]、He-Ne 激光器约为 $1 \times 10^{-8} \text{ s}$ ^[9],粒子可快速弛豫至基态,使得 $N_1 \approx 0$,粒子数反转条件可简化为 $N_2 > 0$,因此四能级系统更易实现激光振荡^[6]。此时增益系数简化为 $G = \sigma_{21} \times N_2$,即增益系数与激光上能级粒子数密度成正比^[7]。在激光形成过程中,只有增益大于损耗才能实现激光振荡,可分为以下阶段:

(1) 初始阶段:刚启动泵浦时,粒子数反转程度较低,介质增益较小,自发辐射产生的初始光子

在腔镜反射作用下在腔内往返传输时,会因腔镜反射、介质吸收/散射、腔镜衍射等损耗导致光强减弱,无法形成振荡激光。

(2) 阈值阶段:通过持续泵浦,粒子数反转程度提高,增益系数随之增大,当增益系数增大到某一数值(阈值增益系数)时,光在腔内循环一次的“增益放大倍数”恰好等于“损耗衰减倍数”。激光器阈值增益系数(G_t)的表达式为

$$G_t = \delta/L \quad (9)$$

其中, $\delta = \alpha \times L + \ln(1/(R_1 \times R_2))/2$ 表示单程损耗因子,令 $\alpha = 0.1 \text{ m}^{-1}$ 、 $R_1 = 0.99$ 、 $R_2 = 0.95$ 、 $L = 0.1 \text{ m}$ 分别表示腔内损耗系数、腔镜反射率(R_1 、 R_2 ,其中 R_2 为输出镜反射率)、谐振腔长度。根据上述参数条件计算可知,此时激光器阈值增益系数 $G_t = 0.407 \text{ m}^{-1}$,腔内光子寿命 $\tau_l = L/(\delta c) = 8.20 \times 10^{-9} \text{ s}$ 。

(3) 出光阶段:持续泵浦使得粒子数反转程度进一步提高, $G > G_t$ 时,光在腔内往返传输过程中增益大于损耗,光强会持续增强,直到受激辐射消耗的高能级粒子数与泵浦补充的高能粒子数达到平衡(粒子数反转程度稳定),光强不再增长,此时腔内光子会通过输出镜向外形成稳定的激光输出。

为了反应激光光强在激光形成过程中的动态变化,令激光光强与腔内光子数密度 Φ 成正比,其计算公式如下

$$I = \frac{1}{2} \times \Phi \times h \times \nu \times c \times (1 - R_2) \quad (10)$$

其中, $\nu = 2.8 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 表示激光频率,1/2 系数表示只有向输出镜传输的部分光子可以透射输出腔外形成激光。

2 参数的影响

2.1 泵浦功率(P)的影响

泵浦功率通过泵浦速率影响粒子数分布($\text{pump_rate} \propto P$)。固定其他参数,仿真不同泵浦功率($P = 0.1 \text{ W}$ 、 1 W 、 5 W 、 10 W 、 50 W 、 100 W)下的粒子数密度、增益及光强变化曲线,结果分别如图 2 和图 3 所示。图 3 虚线表示激光器阈值增益系数 $G_t = 0.407 \text{ m}^{-1}$,泵浦功率决定了系统到达阈值的时间(t_t)和稳定时激光光强(I)。

低泵浦功率下($P = 0.1 \text{ W}$),如图 2(a)、图 3(a)所示,泵浦速率较小,导致 $E_0 \rightarrow E_3$ 、 $E_3 \rightarrow E_2$ 能

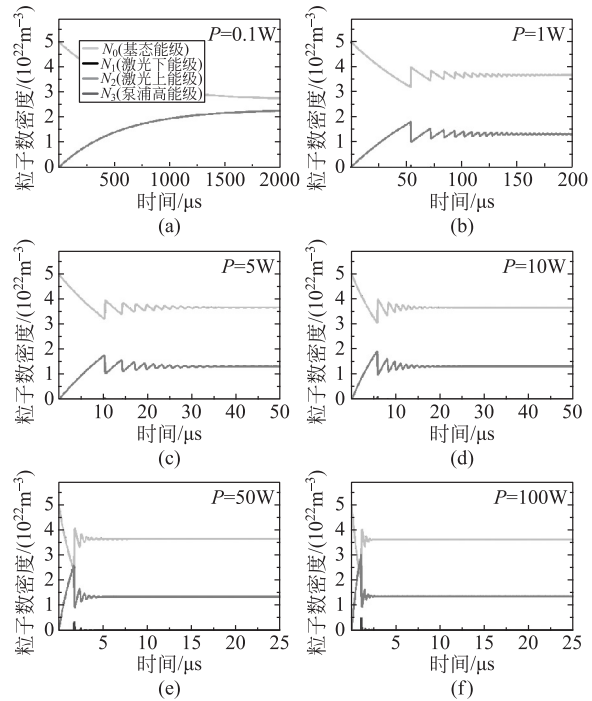


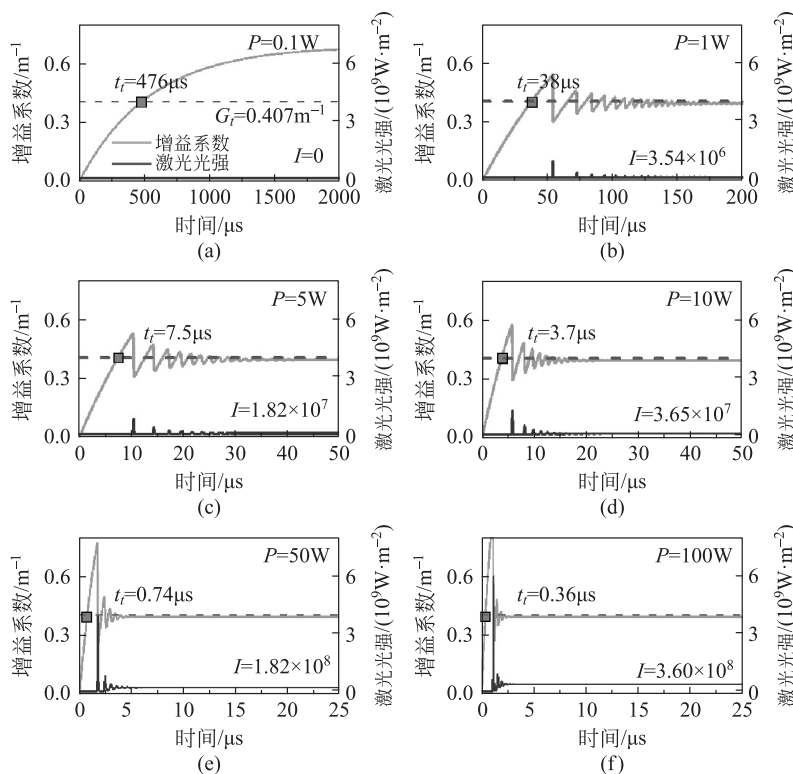
图 2 泵浦功率(P)对各能级粒子数密度的影响

(a) $P = 0.1 \text{ W}$; (b) $P = 1 \text{ W}$; (c) $P = 5 \text{ W}$; (d) $P = 10 \text{ W}$; (e) $P = 50 \text{ W}$; (f) $P = 100 \text{ W}$

级跃迁的粒子数不足, N_0 缓慢减少, N_2 缓慢增加,即使增益系数超过阈值,但受激辐射产生的光子数增长仍慢于腔内损耗(如吸收、衍射),导致光子数密度始终无法积累到振荡所需的临界值,表现为“有增益无输出”。

中泵浦功率下($P = 1 \text{ W}$ 、 5 W 、 10 W),如图 2(b)~(d)、图 3(b)~(d)所示,粒子数密度 N_0 快速减少,激光上能级粒子迅速积累(N_2 增加),增益系数也随之增大,且泵浦功率越大变化越剧烈,增益系数分别于 $38 \mu\text{s}$ 、 $7.5 \mu\text{s}$ 、 $3.7 \mu\text{s}$ 达到阈值。当泵浦达到阈值时,引发剧烈受激辐射,导致光子数密度激增。同时,光子数的增加会加速反转粒子的快速消耗(N_2 快速减少),当光子数达到峰值时,反转粒子已被消耗至阈值以下,导致增益不足,光子数开始衰减。随后,泵浦继续补充高能粒子(N_2 增加),再次触发新一轮振荡。这一过程反复进行,即出现弛豫振荡,激光输出尖峰序列,直到系统达到稳态,各能级粒子最终均稳定在一个固定数值上,增益系数也降低至阈值附近($G = G_t$),此时激光获得稳定输出^[6]。

高泵浦功率下($P = 50 \text{ W}$ 、 100 W),如图 2(e)~(f)、图 3(e)~(f)所示, N_2 增长更快,增益系数更

图3 泵浦功率(P)对增益系数及激光光强的影响(a) $P=0.1\text{W}$; (b) $P=1\text{W}$; (c) $P=5\text{W}$; (d) $P=10\text{W}$; (e) $P=50\text{W}$; (f) $P=100\text{W}$

早达到阈值条件,系统也更快达到稳态。此外,由于泵浦功率过高,高泵浦速率导致 E_3 能级粒子未能及时跃迁至 E_2 能级,使得 E_3 能级保留了部分粒子,图 2(e)~(f)中 $N_3 > 0$ 。

分析表明,无论泵浦功率如何变化,当激光正常运转到达稳态,各能级粒子数最终均稳定在一个固定数值上,增益系数也降低至阈值附近($G=G_t$),激光获得稳定输出。当泵浦功率从 $P=0.1\text{W}$ 逐步增加至 $P=100\text{W}$ 过程中,到达阈值的时间越短,从 $476\mu\text{s}$ 降至 $0.36\mu\text{s}$;稳态时激光光强越大,从 0 增加至 $3.60 \times 10^8 \text{ W/m}^2$ 。

2.2 激光上能级寿命(τ_{21})的影响

激光上能级寿命是决定 N_2 积累能力的关键参数。固定 $P=10\text{W}$,仿真不同能级寿命($\tau_{21}=1 \times 10^{-6}\text{s}, 3 \times 10^{-6}\text{s}, 6 \times 10^{-6}\text{s}, 1 \times 10^{-5}\text{s}, 1 \times 10^{-4}\text{s}, 1 \times 10^{-3}\text{s}$)的影响,结果如图 4 所示。

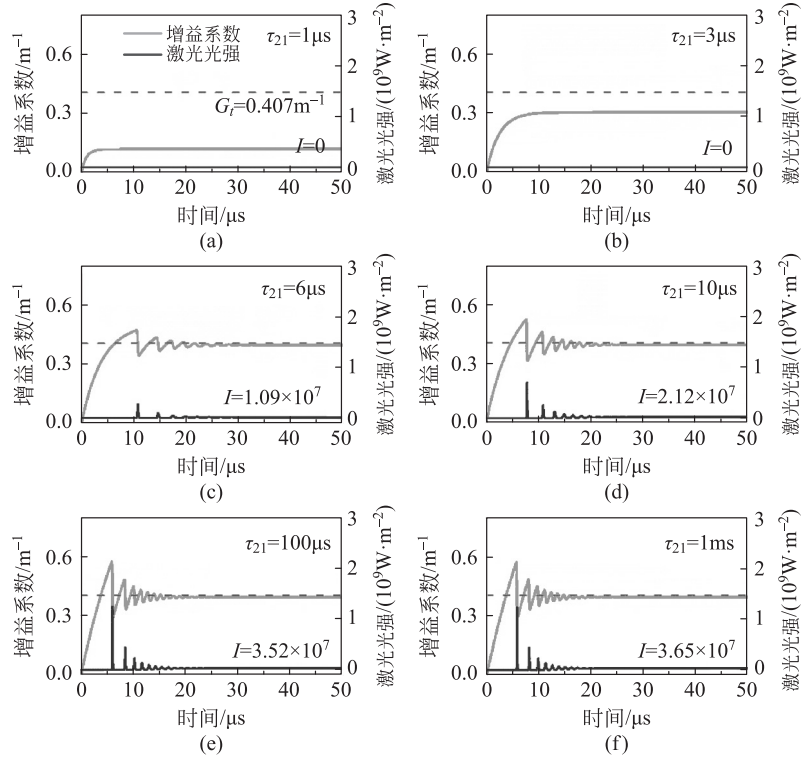
短寿命下($\tau_{21}=1 \times 10^{-6}\text{s}, 3 \times 10^{-6}\text{s}$),如图 4(a)~(b)所示, E_2 能级的粒子弛豫快,导致激光器无法到达阈值实现激光输出。比如 He-Ne 激光器的上能级寿命约 $2 \times 10^{-8}\text{s}$,需要依赖射频放电提供高强度泵浦才能获得激光输出。长寿命下

($\tau_{21}=6 \times 10^{-6}\text{s}, 1 \times 10^{-5}\text{s}, 1 \times 10^{-4}\text{s}, 1 \times 10^{-3}\text{s}$),如图 4(c)~(f)所示, E_2 能级粒子弛豫慢, N_2 可以充分积累而到达阈值,从而实现输出。并且激光上能级寿命越长,激光器增益能力越强,稳态时腔内光子数密度越大,激光光强也随之增大。不同寿命下,增益曲线到达阈值的时间基本相等,表明激光上能级寿命对激光上能级粒子积累速度并无影响。

分析可知,激光上能级寿命决定了反转能力。上能级寿命越长,粒子在能级的停留时间越长, N_2 积累更充分,增益能力越强,有利于获得更大的激光输出光强,这也是激光介质一般选择具有长上能级寿命材料的原因,比如 Nd:YAG 晶体的上能级寿命约 $2.3 \times 10^{-4}\text{s}$ 。反之,上能级寿命越短,粒子在能级的停留时间越短,粒子跃迁速度快,激光的产生和熄灭能更迅速地跟随外部控制信号(如电流、光脉冲),进而提升器件的开关或调制速度。

综合考虑泵浦功率及上能级寿命两种因素,不难得出以下结论:

(1) 长寿命介质:在低泵浦速率下容易实现

图4 激光上能级寿命(τ_{21})对增益系数及激光光强的影响(a) $\tau_{21} = 1\mu\text{s}$; (b) $\tau_{21} = 3\mu\text{s}$; (c) $\tau_{21} = 6\mu\text{s}$; (d) $\tau_{21} = 10\mu\text{s}$; (e) $\tau_{21} = 100\mu\text{s}$; (f) $\tau_{21} = 1\text{ms}$

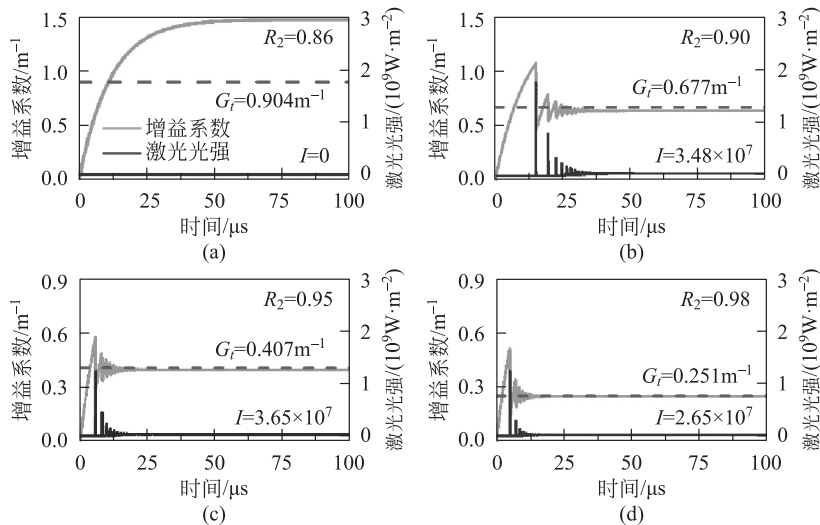
粒子数反转($N_2 > N_1$), 适合构建低阈值激光器。例如, 掺铒光纤($\tau_{21} = 1 \times 10^{-2} \text{s}$) 在微弱泵浦下仍能产生可观增益, 广泛应用于光通信放大器。

(2) 短寿命介质: 需高强度泵浦维持反转, 但响应速度快, 适合高频调制或超短脉冲产生。例如, 染料激光器($\tau_{21} = 1 \times 10^{-9} \text{s}$) 通过锁模技术可

输出飞秒脉冲。

2.3 输出镜反射率(R_2)的影响

输出镜反射率(R_2)降低时, 腔内光子损耗增加, 导致激光振荡阈值(G_r)和稳态反转粒子数($N_2 - N_1$)升高, 需更高粒子数反转才能获得振荡。图5所示为不同输出镜反射率($R_2 = 0.86$,

图5 输出镜反射率(R_2)对增益系数及激光光强的影响(a) $R_2 = 0.86$; (b) $R_2 = 0.90$; (c) $R_2 = 0.95$; (d) $R_2 = 0.98$

0.90, 0.95, 0.98)对增益系数及激光光强的影响。

在泵浦功率 $P=10\text{W}$ 保持不变的情况下,为补偿更大的输出损耗,阈值增益系数随输出镜反射率减小而增大。当 R_2 降至 86% 时, $G_t=0.904\text{m}^{-1}$, 由于泵浦功率不足,上能级粒子积累量不足而难以维持足够增益,导致无法输出激光。随着输出镜反射率的增加,如图 5(b)~(c)所示,当 R_2 从 90% 提升至 95% 过程中,腔内光强损耗降低,阈值增益系数 G_t 随 R_2 减小而减小,从而降低对粒子数反转的需求,稳态反转粒子数 (N_2-N_1) 更低,从而更容易实现激光输出,且稳态时激光输出光强由 $3.48\times 10^7\text{W/m}^2$ 增加至 $3.65\times 10^7\text{W/m}^2$ 。另外,根据公式(10),提高输出镜反射率不利于激光从腔内透射输出腔外,当 R_2 进一步提升至 98% 时,光强再次降至 $2.65\times 10^7\text{W/m}^2$ 。通过绘制激光光强随输出镜反射率的变化曲线可知(如图 6 所示),在输出镜反射率为 93.5% 附近获得 $3.73\times 10^7\text{W/m}^2$ 的最大激光光强。

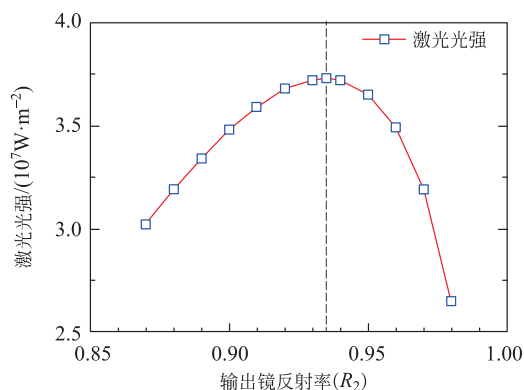


图 6 激光光强随输出镜反射率(R_2)的变化曲线

由此可见,激光光强受输出镜反射率的双重作用:一方面,高反射率使得腔内光子寿命增加,增强受激辐射放大效率,增大腔内光子数密度;另一方面,高反射率直接降低了激光输出耦合,不利于提升输出光强。实际中存在最优输出镜反射率,可平衡腔内放大效率与输出耦合效率,获得最高输出光强。

3 可视化教学应用

在教学实践中,教师全程仅为引导者,以“问题链”为引导主线,通过提问、对比、总结,将抽象物理关系转化为可探究的具象问题,学生全程深

度参与实践。主要包括以下三个环节:

(1) 概念导入环节:通过抛出“反转发生在哪些能级”的核心疑问,引导学生观察粒子跃迁的动态变化过程,通过对比反转与无反转状态的粒子分布,自主提炼“激光上能级与下能级粒子数差”的反转定义,纠正“激光上能级多于基态”的误区。

(2) 参数探究阶段:引导学生亲手调节泵浦功率、上能级寿命等,提示学生对比不同参数下粒子数与增益曲线的变化趋势,记录数据、绘制曲线,归纳参数对粒子数演化和增益的影响规律。

(3) 问题解决环节:以“缩短起振时间”为任务驱动,引导学生基于前序规律提出猜想,通过仿真验证方案有效性,再通过仿真验证优化方案,在试错中明确“泵浦功率影响反转建立速度,上能级寿命决定反转能力”的核心逻辑,适时点拨“增益阈值条件”的物理本质,实现从“观察”到“探究”再到“应用”的认知升级。

学生反馈显示,可视化仿真让“粒子数演化”“阈值增益系数”等抽象概念具象化,87% 的学生能清晰阐述参数与增益的关联,78% 的学生理解能级跃迁的动态过程。这种反馈表明,学生不仅掌握了规律,更领悟了“透过现象看本质”的物理探究方法,实现了从知识记忆到思想建构的提升。

4 结语

本文基于 Matlab 构建四能级激光速率方程可视化仿真平台,系统分析了泵浦功率、上能级寿命、输出镜反射率对粒子数密度、增益系数及输出光强的影响,揭示了以下关键规律:泵浦功率决定粒子数反转的建立速度,上能级寿命直接限制粒子数积累能力,以及存在最优的输出镜反射率。该平台将抽象的速率方程转化为可交互的仿真结果,有效突破了传统教学的局限,帮助学生建立参数与物理过程的直观联系。未来可进一步拓展至调 Q、锁模等复杂激光系统,为激光原理教学提供更全面的辅助工具。

参 考 文 献

- [1] 蒋国保,陈英,林文烽,等. MATLAB 仿真辅助激光原理教学的优势[J]. 长沙大学学报, 2019, 33(5): 17-20.

(下转第 100 页)

- [5] 宋洪晓,徐建强,韩广兵.物理实验课堂教学与手机动画技术的融合实践:以迈克耳孙干涉实验为例[J].物理实验,2022,42(4):41-46.
SONG H X, XU J Q, HAN G B. Practice of integrating physics experimentation classroom teaching and mobile telephone animation technology: Taking the Michelson interference experiment as an example[J]. Physics Experimentation, 2022, 42(4): 41-46. (in Chinese)
- [6] 闫慧仙,吴天刚,王祖源.基于HTML5Canvas的跨平台物理模型构建[J].物理与工程,2014,(S1):19-20.
YAN H X, WU T G, WANG Z Y. Cross-platform physics model construction based on HTML5 Canvas[J]. Physics and Engineering, 2014, (S1): 19-20. (in Chinese)
- [7] 白亮,马成举.基于微信结合H5技术的大学物理实验教学创新研究[J].大学物理,2019,38(12):40-43.
BAI L, MA C J. Research on teaching innovation of university physics experiment based on WeChat combined with H5 technology[J]. College Physics, 2019, 38(12): 40-43. (in Chinese)
- [8] 饶益花,管亮,唐益群,等.基于组件开发及动画技术的快速电子动量与动能的相对论关系虚拟仿真实验[J].物理实验,2020,40(1):30-34.
RAO Y H, GUAN L, TANG Y Q, et al. Virtual simulation experiment of relativistic relationship between electron momentum and kinetic energy based on component development and animation technology[J]. Physics Experimentation, 2020, 40(1): 30-34. (in Chinese)
- [9] 关丽,郭颖楠,王凤和.物理类新形态教材建设现状与思考[J].物理通报,2024(8):156-159.
GUAN L, GUO Y N, WANG F H. Current situation and reflection on the construction of new form textbooks in physics[J]. Physics Bulletin, 2024(8): 156-159. (in Chinese)
- [10] 杨虎威.交互式电子教材测验机制的研究与实现[D].湖北武汉:华中师范大学,2016.
YANG H W. Research and implementation of testing mechanism in interactive electronic textbooks[D]. Wuhan, Hubei: Central China Normal University, 2016. (in Chinese)
- [11] 周燕霞,闫晓勇.“互联网+教育”时代新形态课程教学资源的建设与应用[J].高教学刊,2022,8(6):57-60.
ZHOU Y X, YAN X Y. Construction and application of teaching resources for new form of curriculum in the era of “Internet + Education”[J]. Journal of Higher Education, 2022, 8(6): 57-60. (in Chinese)
- [12] 王希光,傅林,成禹,等.融入HTML5的数值仿真在光学教学中的应用研究[J].大学物理,2025,44(3):64-69.
WANG X G, FU L, CHENG Y, et al. Research on the application of numerical simulation integrated with HTML5 in optics teaching[J]. College Physics, 2025, 44(3): 64-69. (in Chinese)

(上接第91页)

- JIANG B G, CHEN Y, LIN W F, et al. Thinking on the application of MATLAB simulation in laser principle teaching[J]. Journal of Changsha University, 2019, 33(5):17-20. (in Chinese)
- [2] 李伦,龚马利,刘兴占,等. MATLAB用于激光光束质量分析[J].激光技术,2000,24(6):405-408.
LI L, GONG M L, LIU X Z, et al. A software for laser beam analysis[J]. Laser Technology, 2000, 24(6): 405-408. (in Chinese)
- [3] 王玉杰,李武军,李恩琪.方形镜对称共焦腔激光模式的数值模拟研究[J].河南科技,2021(6):42-46.
WANG Y J, LI W J, LI E Q. Numerical simulation research on laser mode of square mirror symmetrical confocal cavity[J]. Henan Science and Technology, 2021(6): 42-46. (in Chinese)
- [4] 殷建玲,敖志伟,沈学举,等.基于MATLAB GUI的激光原理仿真[J].教育教学论坛,2017(36):275-276.
YIN J L, AO Z W, SHEN X J, et al. Simulation of laser principle based on MATLAB GUI[J]. Education Teaching Forum, 2017(36): 275-276. (in Chinese)
- [5] 毛少娟,陈玉丹,殷建玲.基于MATLAB的物理光学仿真[J].教育教学论坛,2016(44):100-102.
MAO S J, CHEN Y D, YIN J L. Physical optics simulation based on MATLAB[J]. Education Teaching Forum, 2016(44): 100-102. (in Chinese)
- [6] 王晓峰,康冬丽,树俊波,等.激光形成过程和谐振腔自再现模的数值分析[J].大学物理,2011,30(11):10-14.
WANG X F, KANG D L, SHU J B, et al. Numerical simulation of the laser formation and self-reproducing in optical oscillator[J]. College Physics, 2011, 30(11): 10-14. (in Chinese)
- [7] 李文材.激光原理及应用课程教学与MATLAB仿真结合的探索[J].办公自动化,2025(3):46-49.
LI W C. Exploration of integrating MATLAB simulation with the teaching of the course(Laser Principles and Applications)[J]. Office Informatization, 2025(3): 46-49. (in Chinese)
- [8] 李适民.激光器件原理与设计[M].北京:国防工业出版社,1998:158-175.
LI S M. Principle and design of laser device[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998: 158-175. (in Chinese)
- [9] 周炳琨.激光原理[M].7版.北京:国防工业出版社,2017:227-230.
ZHOU B K. The Principle of Laser[M]. 7th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2017: 227-230. (in Chinese)