

半导体激光器的虚拟实验仿真系统^①

刘 林

西南大学 电子信息工程学院, 重庆 400715

摘要: 根据半导体激光器的工作原理及速率方程, 基于图形化编程语言 LabVIEW 开发出一套半导体激光器虚拟实验系统. 该系统界面简洁, 操作简单, 交互性强, 能够演示和模拟半导体激光器在自由运行条件下的输出情况, 学生可以对大部分参数进行修改, 录入后系统能够自动得出在此条件下的半导体激光器输出特性, 使学生能够对半导体激光器的工作特性以及各类参数对其输出特性的影响有一个较为全面的认识. 该虚拟实验系统可用于课前预习和课堂演示, 对于提升实验教学效果具有很好的辅助作用.

关 键 词: 半导体激光器; 实验教学; 光纤通信; LabVIEW

中图分类号: TN365; G642.0

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2019)02-0111-06

自上世纪六十年代问世以来^[1], 半导体激光器以其质量轻、体积小、成本低、可直接调制、转换效率高、寿命长、易于集成等独特优势而成为光纤通信系统中不可替代的重要光源^[2-3]. 其发展速度之快、波长覆盖范围之宽和应用范围之广是其他激光器所无法比拟的. 而对于半导体激光器输出特性的实验研究是光纤通信课程中不可缺少的实验教学内容^[4]. 目前实验教学中通常采用封装好的半导体激光器进行测试, 学生只需加上电流并读出激光器输出功率即可得到该激光器的 $P-I$ 曲线, 而学生不能对其他参数进行调节, 也无法全面地了解半导体激光器工作的原理以及各类参数对激光器输出的影响. 因此, 有必要开发出一套半导体激光器虚拟实验系统, 使学生能够在课堂以及课下进行更加全面的仿真操作, 有助于学生更加深入地掌握实验内容. 基于此, 本文利用半导体激光器速率方程及图形化编程语言 LabVIEW 开发出半导体激光器虚拟实验系统.

1 实验原理

1.1 系统结构

系统的结构示意图如图 1 所示. 半导体激光器由电流模块(CC)和温控模块(TC)控制, 可以精确地调节其偏置电流和温度, 激光器输出的光由分束器 1(OC1)分为两束, 一束进入功率计(PM)探测激光器的输出功率, 另一束被分束器 2,3(OC2,OC3)分为三束, 一束进入光谱仪(OSA)探测输出激光的波长、另两束分别通过光电探测器 1,2(PD1,PD2)后进入实时示波器(OSC)和频谱分析仪(ESA), 分别探测激光器输出的波形和频谱.

① 收稿日期: 2018-01-03

作者简介: 刘 林(1962-), 男, 工程师, 主要从事电子信息实验教学方面的研究.

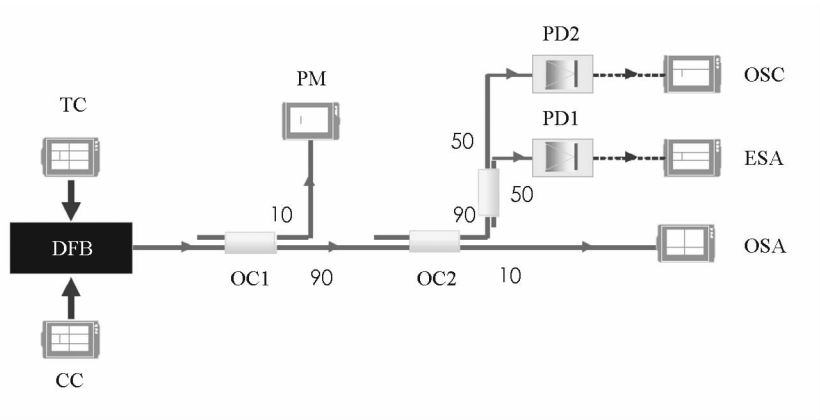


图 1 虚拟实验系统结构示意图

1.2 理论模型

描述半导体激光器输出特性的速率方程为^[5]

$$\frac{dA(t)}{dt} = \frac{1}{2}G_n\{n(t) - n_{th}\}A(t) \tag{1}$$

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{1}{2}\alpha G_n\{n(t) - n_{th}\} \tag{2}$$

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{J}{ed} - \frac{n(t)}{\tau_s} - G_n\{n(t) - n_0\}A^2(t) \tag{3}$$

其中 A, ϕ, n 分别表示激光场振幅、相位和载流子浓度， G_n 为光增益系数， n_{th} 为阈值载流子浓度， n_0 为透明载流子浓度， α 为线宽增强因子， J 为注入电流密度， e 为电子电量， d 为激活层厚度， τ_s 为载流子寿命。该速率方程组能够描述半导体激光器运行情况，通过利用四阶龙格库塔法数值求解该方程组，就可以获得半导体激光器输出特性。

本虚拟实验系统就是基于该理论模型，实现对半导体激光器测试实验的理论模拟仿真，从而使学生能够更加深入广泛地了解半导体激光器的工作原理以及影响半导体激光器工作特性的因素。而且，通过本虚拟实验系统，学生能够通过调节通常实验中无法调节的参数，来考察半导体激光器的输出特点，实现了对实际的实验操作的一种扩展，作为一种辅助手段，能够显著地提高实验教学的效果。

2 半导体激光器虚拟实验系统

2.1 系统简介

半导体激光器的工作原理比较复杂，而传统的测试实验比较简单，学生只能观察到简单的现象，通常只需要绘制出该激光器的 $P-I$ 曲线就可以了，但学生对于半导体激光器的工作原理以及影响其输出特性的因素等基本没有任何印象，因此，为学生提供一套半导体激光器测试的虚拟实验系统，让老师在课堂上进行讲解，让学生在课下进行模拟仿真，有助于学生更加深入牢固地掌握实验教学的内容。

在各种虚拟仪器开发平台中，LabVIEW 作为图形化编辑语言具有其独特的优势^[6]。LabVIEW 采用数据流编程方式，直观易懂，并提供很多外观与传统仪器(如示波器、频谱仪、光谱仪等)类似的控件，可用来方便地创建用户界面，能够开发出交互性很强的虚拟仪器。近年来，随着教学手段的日益多样化，LabVIEW 在高校实验教学中的重要作用正逐渐显现，已经涌现出一系列有实践意义的研究成果^[7-12]。因此，本文开发出一套基于 LabVIEW 的半导体激光器虚拟实验系统。

如图 2 所示，该虚拟实验系统操作界面分为 3 个区域，左边区域为激光器参数设定区，这里列出了几个半导体激光器的重要参数以及描述激光器运行的速率方程组。其中 G_n 为增益系数， τ_s 为载流子寿命， n_{th} 为阈值载流子密度， n_0 为透明载流子密度， α 为线宽增强因子， d 为激活层厚度， T 为温度。激光器初始运

行条件在该区域进行设定。右边区域为激光器 P - I 曲线测定区，通过设定激光器注入电流的初始值、步长以及组数，可以控制电流从小到大或从大到小进行扫描，模拟出该激光器在不同注入电流下的输出功率，绘制出相应的 P - I 曲线，并依此计算出该激光器的阈值电流 I_{th} 。中间区域为激光器输出光谱测定区，在设定的参数下，系统能够计算出该状态下激光器输出的光谱图，从而测定激光器输出的中心波长等参数。为了实现本系统的功能，本文主要的工作是需要求解出半导体激光器的速率方程，获得激光器输出的激光电场强度随时间的变化规律并由此显示不同运行条件下半导体激光器的输出特性。为此我们在程序框图设计中调用了 LabVIEW 的“数学”-“常微分方程”目录下的“ODE 库塔四阶方法”子 VI 对速率方程进行求解。利用数值求解结果，进一步调用“信号处理”-“变换”目录下的“FFT”子 VI 能够获得激光器输出的光谱。

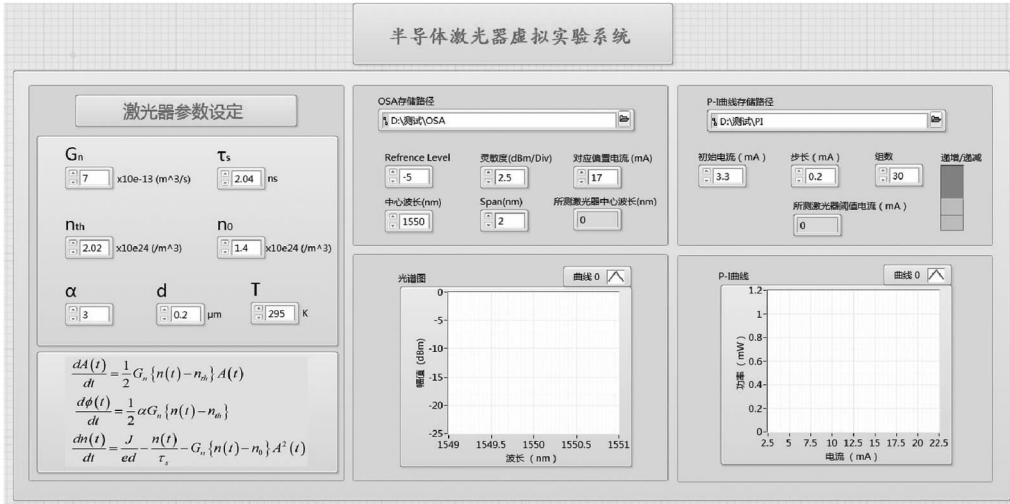


图 2 虚拟实验系统操作界面

2.2 半导体激光器的 P - I 曲线

半导体激光器最重要的基本参数就是阈值电流 I_{th} ，实验中可以通过测定 P - I 曲线来获得 I_{th} 。该虚拟实验系统能够测量不同运行条件下半导体激光器的 P - I 曲线，并测定其阈值电流 I_{th} 。图 3(a)为激光器参数设定，(b)为该运行条件下测得的 P - I 曲线。

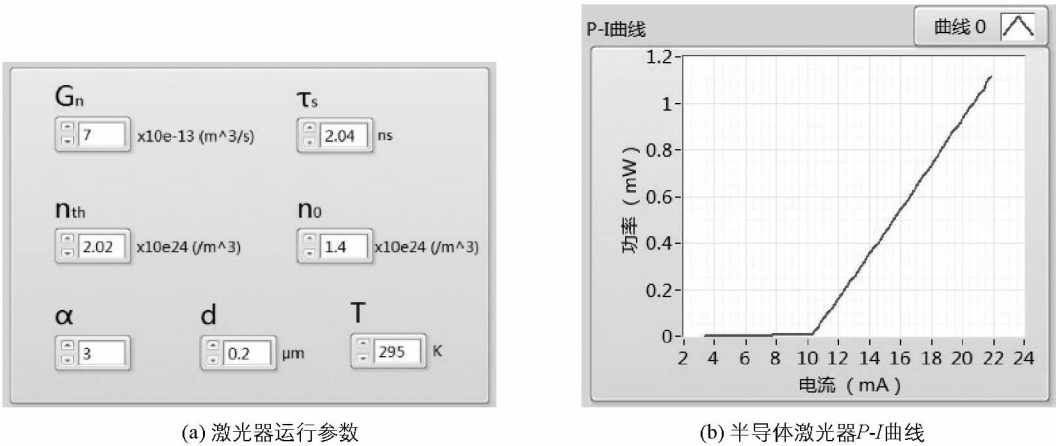


图 3 激光器运行参数及该条件下仿真获得的 P - I 曲线(载流子寿命 $\tau_s=2.04$ ns)

当激光器参数设定如图 3(a)所示时，系统运行即获得了图 3(b)所示在此条件下激光器的 P - I 曲线，并由此测量数据根据直线拟合法算出此时的激光器阈值电流为 10.2 mA。由此图可以看出，当激光器的偏置电流小于 10.2 mA 时，激光器输出的功率非常低，此时激光器处于自发辐射状态，无法输出激光；而当偏

置电流达到 10.2 mA 以后, 激光器的输出功率迅速增加, 并与电流成正比例变化, 此时激光器处于受激辐射状态, 即输出激光. 而光纤通信实验中所需要的光源必须是激光光源, 因此就规定了实验中偏置电流的选取范围.

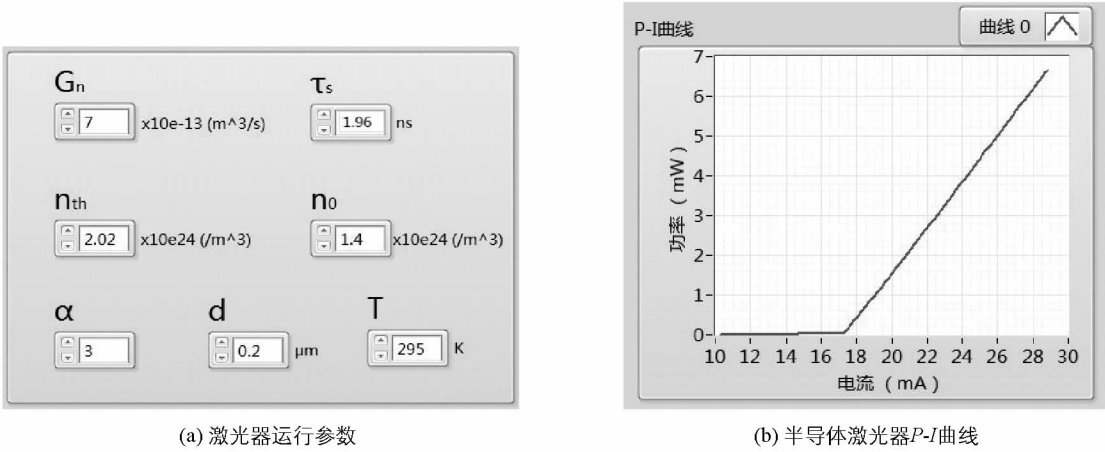


图 4 激光器运行参数及该条件下仿真获得的 P - I 曲线(载流子寿命 $\tau_s=1.96$ ns)

当激光器参数设定如图 4(a)所示时, 系统运行获得的 P - I 曲线如图 4(b)所示. 在该运行条件下, 模拟得到的激光器的阈值电流为 17.3 mA. 由于此次变化的参数只有载流子寿命 τ_s , 因此通过多次模拟可以发现, 激光器的阈值电流随着载流子寿命的减小而增大. 此外, 通过模拟还发现, 激光器的阈值电流随阈值载流子密度 n_{th} 的增加而增大, 随激活层厚度 d 的增加而增大.

2.3 半导体激光器输出的光谱

半导体激光器的另外一个重要的输出特性就是其光谱图, 即激光器输出波长. 由于在光纤通信实验中, 对激光的波长具有较严格的要求, 其波长必须位于光纤的几个通信窗口, 其中最常用的通信波长为 1 550 nm. 该虚拟实验系统能够模拟不同实验条件下的激光器输出光谱, 并由此确定其中心波长.

当半导体激光器运行参数为图 5(a)所示且偏置电流为 9.5 mA 时, 激光器输出的光谱图为图 5(b)所示. 而此条件下激光器的阈值电流为 10.2 mA 时, 即激光器工作在阈值以下.

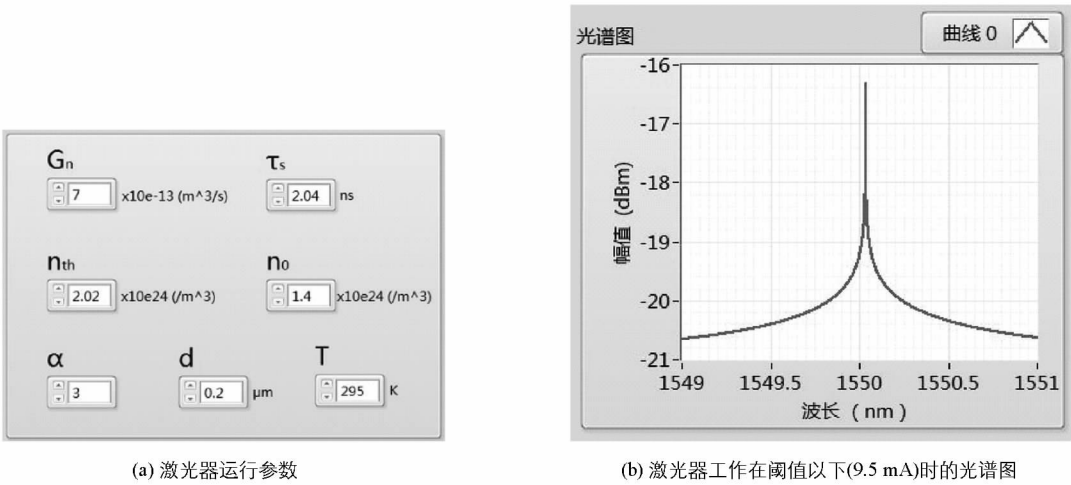


图 5 激光器运行参数及其工作在阈值以下时输出的光谱图

由以上的分析可知, 当激光器工作在阈值以下时, 激光器处于一种自发辐射的状态. 由图中可以看出, 该状态的激光输出功率很低, 而且其光谱相对较宽, 所包含的波长成分较多.

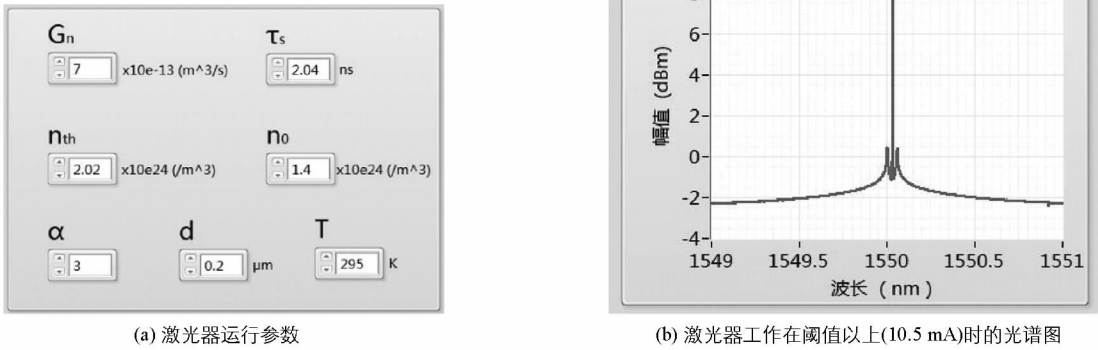


图 6 激光器运行参数及其工作在阈值以上(10.5 mA)时的光谱图

图 6 所示为其他条件不变的情况下，激光器偏置电流增大到 10.5 mA 时，激光器输出的光谱图。由此可见，此时激光器工作在阈值以上时，激光输出功率迅速增大，且光谱突然变窄，在其中心波长处几乎为一条没有宽度的线，此时即为受激辐射，而发射出的激光的单色性非常好。同时，该系统测出此时激光器输出的中心波长为 1 550.03 nm。同样，影响激光器输出波长的因素也有很多，图 7 所示为当温度降低到 290 K 时激光器的输出光谱图。

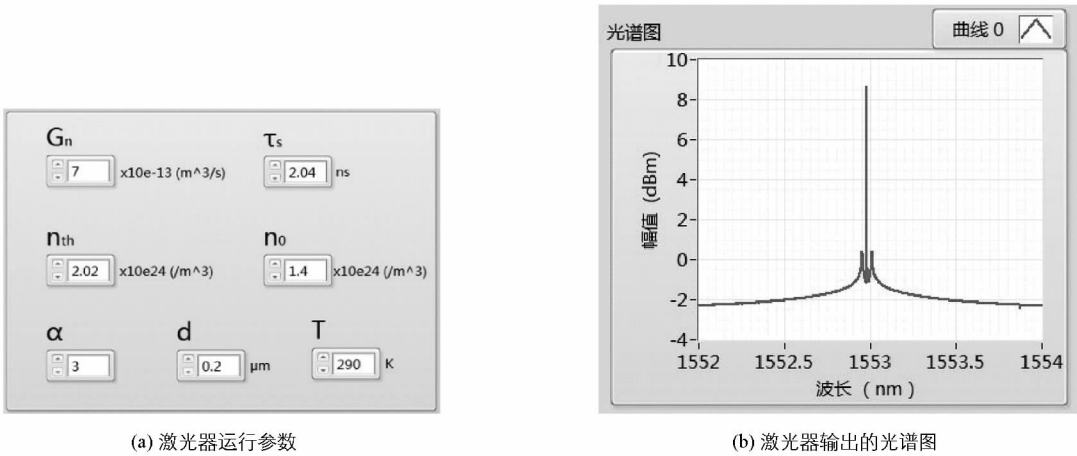


图 7 激光器运行参数及其在温度为 290 K 时输出的光谱图

由图中可以看出，当温度降低时，激光器输出的中心波长会向短波方向移动，相反，当温度升高时，激光器的中心波长会向长波方向移动。此外，模拟结果还发现，半导体激光器的发射波长会随着偏置电流的增大而变长。

3 结 论

通过与实验测试结果相对比，该虚拟实验系统能够准确地模拟光纤通信实验中半导体激光器性能测试的实验内容。利用该虚拟系统，本文主要分析了半导体激光器的 $P-I$ 曲线(阈值电流 I_{th})和激光器输出的光谱图的模拟结果，通过参数的设定，能够改变相应激光器的输出特性，这对于加深学生对半导体激光器的工作特性的理解具有很好的辅助作用，再结合具体的实验操作，能够使学生更好地掌握相关的内容，从而达到实验教学的要求。该系统无论是作为课前预习或课堂演示，都能够起到比较好的教辅作用。

此外，该系统具有较好的延展性，还可为相关专业研究生提供学习辅助。在后期的开发中能够继续扩

展其模拟功能,比如进一步测量激光器输出的频谱特性,当激光器受到微扰时的动态特性等,均可在该系统中实现.

参考文献:

- [1] HALL R N, FENNER G E, KINGSLEY J D, et al. Coherent Light Emission from GaAs Junctions [J]. Phys. Rev. Lett., 1962, 9(9): 366—368.
- [2] 江剑平. 半导体激光器 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [3] 何 秀, 熊中碧, 林晓东, 等. 光注入下 VCSEL 在阈值电流附近的非线性响应特性 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 39(3): 170—175.
- [4] 刘增基. 光纤通信 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
- [5] OHTSUBO J. Semiconductor laser: Stability, Instability and Chaos [M]. Second, Enlarged Edition. Berlin: Springer, 2007: 37.
- [6] JEFFREY T, JIM K. LabVIEW for Everyone: Graphical Programming Made Easy and Fun [M]. 3 Edition. New Jersey: Prentice Hall, 2006: 320—516.
- [7] 唐 曦, 谭兴文, 雷衍连, 等. 基于 LabVIEW 的声速测量虚拟实验系统 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2014, 39(7): 214—217.
- [8] 沈 欢, 王云秀, 沈钻杨, 等. 基于 LabVIEW 的电子虚拟实验室构建 [J]. 科技经济导刊, 2016(31): 24—25.
- [9] 陈 彪, 吴春法. 基于 LabVIEW 的多光学现象动态仿真 [J]. 电脑知识与技术, 2017, 13(29): 265—266, 274.
- [10] 何 慧, 田卫华. 基于 LabVIEW 和 Matlab 的电力电子技术虚拟实验平台的设计开发 [J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2018, 14(1): 35—40.
- [11] 张国强, 王 斌, 赵 静. Matlab 与 LabVIEW 在信号与系统课程辅助教学中的应用 [J]. 实验技术与管理, 2017, 34(11): 145—148.
- [12] 陈 昊, 张德伟, 史颖刚, 等. 基于 LabVIEW 的虚拟控制实验系统设计 [J]. 高校实验室工作研究, 2017(4): 22—24.

On a Virtual Simulation Experimental System of Semiconductor Laser

LIU Lin

School of Electronic and Information Engineering, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: According to the operation principle and the rate equation of semiconductor laser, a simulation system of the semiconductor laser based on LabVIEW has been developed. The system has a brief navigating interface, simple operation and good interaction. It can simulate and display the output of a semiconductor laser work on free-running conditions. Students can modify many parameters of the laser and then the system shows the results of simulation. In this way, students can make a comprehensive understanding to operating characteristics of semiconductor laser and influences by operating parameters. The simulation system can be used in the procedure of preparation and teaching of the experiment. It is an auxiliary tool for improving teaching effect.

Key words: semiconductor laser; experimental teaching; fiber communication; LabVIEW

责任编辑 汤振金