

激光与光电子学进展

利用等效电路分析提高 1550 nm 脉冲半导体激光发射模块性能

李莉^{1,2**}, 李林^{1*}, 应家驹², 李刚², 王元铂²¹北京理工大学光电学院, 北京 100081;²中国人民解放军陆军工程大学石家庄校区电子与光学工程系, 河北 石家庄 050000

摘要 为适应人眼安全激光主动探测应用对探测激光高功率、窄脉宽的要求,提出了一种利用等效电路模型分析提高 1550 nm 脉冲半导体激光发射模块性能的方法。基于特定激光器参数建立对应的等效电路模型,并将模型引入发射模块脉冲驱动电路,通过仿真分析,得出影响模块高功率、窄脉冲激光输出特性的关键因素。将优化后两种封装的激光器接入设计制作的脉冲激光发射模块进行输出激光脉冲测试,实测结果验证了仿真的准确性,说明等效电路分析方法可应用于评价及优化提高激光发射模块的性能。最终获得了最大输出功率 20 W 以上、脉冲宽度小于 10 ns 的光脉冲,该模块实现了高功率、窄脉冲的激光输出。

关键词 激光主动探测; 1550 nm 多量子阱激光器; 等效电路; 高功率; 窄脉冲宽度

中图分类号 TN29

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231186

Performance Improvement of 1550 nm Pulse Laser Diode Transmitter Module Using Equivalent Electrical Circuit Analysis

Li Li^{1,2**}, Li Lin^{1*}, Ying Jiaju², Li Gang², Wang Yuanbo²¹School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;²Department of Opto-Electronics Engineering, Shijiazhuang Campus, Army Engineering University of PLA, Shijiazhuang 050000, Hebei, China

Abstract To adapt the requirements of high power and narrow pulse width of detection laser in the active detection application for the eye-safe laser, a method for improving the performance of 1550 nm pulse laser diode transmitter module using equivalent circuit model analysis is proposed. The equivalent circuit model is established based on the specific laser parameters, and the model is introduced into the pulse drive circuit of the transmitter module. The key factors affecting the output characteristics of high power, narrow pulse laser are obtained through simulation analysis. The optimized two package lasers are connected to the pulse laser transmitter module to test the output laser pulse. The measured results are consistent with the simulation results, it is proved that the equivalent circuit analysis method can be used to evaluate and optimize the performance of the laser transmitter module. Finally, the optical pulse with the maximum output power over 20 W and the pulse width less than 10 ns is obtained that realizing laser output with high power and narrow pulse.

Key words laser active detection; 1550 nm multi-quantum well laser; equivalent electrical circuit; high power; narrow pulse

1 引言

基于飞行时间(TOF)的激光主动探测技术通常利用连续激光相位比较法或短脉冲激光往返时间测量法。相比于利用微波波段的技术,激光主动探测技术

成本更低,空间测量精度更高。已有研究表明,连续激光和脉冲激光 TOF 法都能在较宽的测量范围内提供 mm 级的高精度测量,尤其是脉冲 TOF 技术,测量速度快且能处理多个回波,因此,在激光雷达、自动驾驶、三维成像、医疗等领域有巨大的应用潜力^[1-5]。该技术通

收稿日期: 2023-04-27; 修回日期: 2023-06-13; 录用日期: 2023-06-30; 网络首发日期: 2023-07-10

通信作者: *bit421@bit.edu.cn; **lilopt@163.com

常使用近红外半导体激光器作为光源,配合脉冲驱动电路形成大功率、窄脉冲激光发射模块。已得到广泛使用的脉冲 TOF 技术的工作波段为 800~1000 nm,但人眼视网膜对此波段的激光吸收较强,容易造成人眼损伤^[6]。另外,此波段的激光可被廉价的硅光电探测器接收,在光电对抗环境中,于己方没有优势。1550 nm 波长激光被称为人眼安全激光^[7],且具有穿透烟雾能力强、空气衰减和太阳背景噪声低以及探测成本高的优势,逐渐成为军用民用领域关注的重点^[8]。1550 nm 多量子阱激光器将多量子阱结构用于法布里-珀罗(F-P)型激光器中以降低激光器的阈值电流、功耗,并改善其温度特性等,成为当代高性能半导体激光器件的典型结构。

模拟半导体激光器的一种方法是使用器件级模型,包括空间行为的多维分析以及光学特性的详细解决方案。然而,器件级模型程序的计算密集度庞大,并不是光电系统设计的理想工具,特别是当分析过程中包括寄生参量和驱动电路时,模型需要具备比器件级模型计算量更少,同时还能够准确复刻实际器件的工作特性^[9]。利用等效电路的方法将更为合适^[10]。为此,国内外研究人员对能够在标准电路模拟环境中准确模拟激光器终端特性的电路级激光器模型,包括双异质结半导体激光器、量子阱器件和垂直腔面发射激光器等效电路模型^[11-16],展开了研究。为了更准确地表达激光器的工作特性,需要根据实际器件情况,用更复杂的方程和更多的参数来改善模型的性能。另外,

在研究半导体激光器驱动电源时,多采用等效负载(如功率二极管)替代大功率半导体激光器。但功率二极管将电能全部转化为热能,无法模拟大功率半导体激光器的电光转换特性^[17]。本文针对 1550 nm 多量子阱半导体激光器建立等效电路模型,并将其接入脉冲驱动电路,进行激光发射模块协同设计优化;对实际激光发射模块进行测试,以验证模块实现了大功率、窄脉冲的激光输出。

2 多量子阱半导体激光器等效电路模型

采用 InGaAlAs/InP 半导体材料系的 1550 nm 单结激光器,器件的外延层结构及能带如图 1(a)、(b)所示。激光有源区位于梯度折射率型的波导层的中心,有源区是包含 InGaAlAs 阱和势垒层的应变补偿多量子阱结构,利用两者之间的带阶可以限制载流子。波导层外为上、下包覆层,利用两者之间的折射率差可以限制光子。将载流子限制在有源层内,光子限制在波导层内的设计,即为渐变折射率分别限制异质结构,且其采用非对称的形式以减小内部光学损耗。如图 1(c)所示,垂直于有源区的左、右自然晶体解理面,互相平行构成 F-P 谐振腔。谐振腔提供强的纵向光反馈,通过光增益补偿谐振腔内的光损耗,保证稳定的激光发射。在速率方程及特定结构的量子阱激光器载流子输运方程联合求解框架下,建立等效电路模型,即激光器速率方程经数学变换得到以电路元器件形式表示的电路方程。

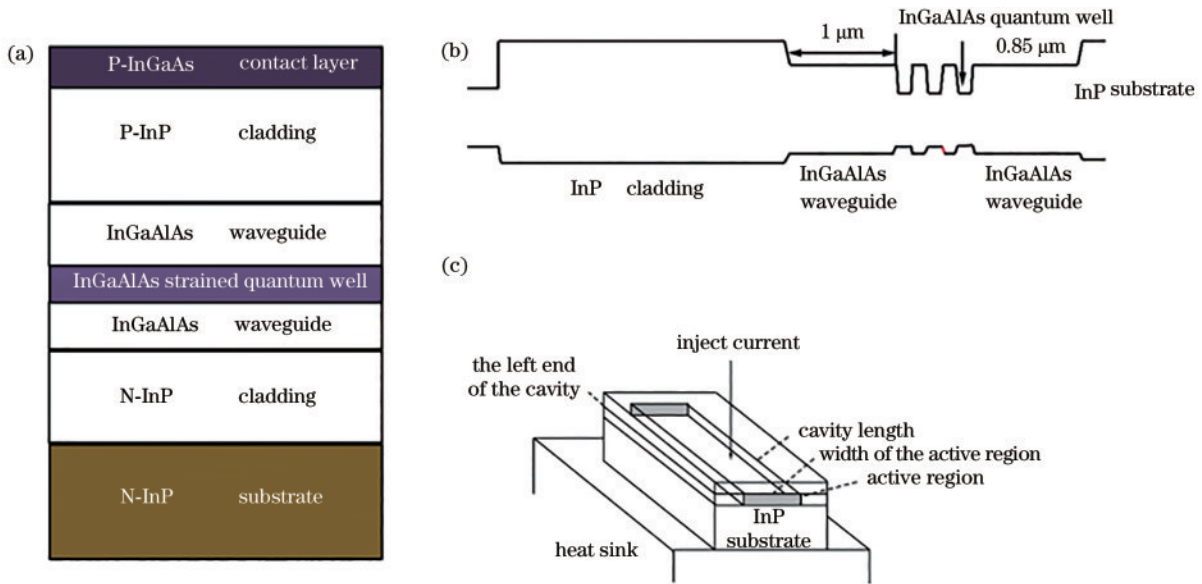


图 1 激光器物理模型。(a)器件外延层结构;(b)能带图;(c)激光器基本结构

Fig. 1 Physical model of the laser. (a) Structure of the chip epitaxial; (b) band diagram; (c) basic structure of the laser

设载流子通过外部电流从包覆层注入到波导层[即光限制(OCL)区]中,OCL区中无约束载流子将向量子阱区扩散并被其俘获。以下标 p-OCL 表示本区的参量,对应的等效电路方程为

$$V_{p-OCL} \frac{dv_{p-OCL}}{dt} = I_j - I_{r-OCL} - I_{p-OCL}, \quad (1)$$

式中: V_{p-OCL} 为 p 侧 OCL 区的体积; $v_{p-OCL} = qn_{p-OCL}$ 为等效节点电压,其中, q 为电子电荷, n 为对应区的电子

含量;方程左项等效为流过电容节点的电流,电容值为 V_{p-OCL} ,此时变项即变换为一个电容的形式, I_j 为注入电流; $I_{r_{p-OCL}} = qV_{p-OCL}R_{p-OCL}$ 为复合电流项; $I_{p-OCL} = \frac{q(V_{p-OCL}n_{p-OCL} - V_w n_{b1})}{\tau_{p-OCL}}$ 为此区中的三维载流子的漂

移扩散电流,其中, V_w 为量子阱区的体积, n_{b1} 为一个准二维区的电子含量, τ_{p-OCL} 为有效空间传输时间, $\tau_{p-OCL} = \frac{L_{p-OCL}^2}{2D^*}$ (L_{p-OCL} 为此区厚度, D^* 为双极性扩散系数)。

处在量子阱中但能量高于量子阱二维态的电子为准二维载流子,其通过扩散跨越势垒,因此,对于第 j 个准二维区(以下标 b_j 表示, $j = 2, 3, \dots, m$, m 为量子阱个数),对应的等效电路方程为

$$V_w \frac{dv_{b_j}}{dt} = I_{D,j-1} - I_{\tau_{b_j}} - I_{D_j} + I_{e_j} - I_{c_j}, \quad (2)$$

式中: $v_{b_j} = qn_{b_j}$ 为电容项的等效节点电压; $I_{\tau_{b_j}} = qV_w R_{b_j}$ 为复合电流; $I_{e_j} = V_w \frac{v_{b_j}}{\tau_c}$, $I_{c_j} = V_w \frac{v_{w_j}}{\tau_e}$ 分别为量子阱捕获以及逃逸电流,其中 τ_c , τ_e 分别为载流子捕获和逃逸时间; I_{D_j} 为跨越第 j 个势垒的扩散电流, $I_{D_j} = \frac{q(V_w n_{b_j} - V_w n_{b,j+1})}{\tau_b}$, 其中 $\tau_b = \frac{L_b^2}{2D^*}$ 为跨越势垒的扩散时间, L_b 为势垒厚度;对于 $j = 1$, $I_{D,j-1}$ 即为 I_{p-OCL} 。

对于量子阱区,载流子的产生来自量子阱净捕获,载流子消耗包括复合消耗 R_{w_j} 和受激辐射消耗,因此,对于第 j 个量子阱区(以下标 w_j 表示, $j = 1, 2, \dots, m$, m 为量子阱个数),等效电路方程为

$$V_w \frac{dv_{w_j}}{dt} = I_{c_j} - I_{e_j} - I_{\tau_{w_j}} - I_{st,j}, \quad (3)$$

式中: $v_{w_j} = qn_{w_j}$ 为电容项的等效节点电压; $I_{\tau_{w_j}} = qV_w R_{w_j}$ 为复合电流; $I_{st,j} = V_w v_g G(n_{w_j}, s) v_s$ 表示受激辐射项,其中, v_g 为群速度, $G(n_{w_j}, s)$ 为光增益, $v_s = qs$ (s 为光子密度)。对于量子阱有源区,单位时间内的非线性增益为 $G(n_{w_j}, s) = \frac{v_g g_w}{1 - \epsilon s} \ln\left(\frac{n_w}{n_0}\right)$, 其中: ϵ 为增益压缩因子; g_w 为增益常数; n_0 为透明载流子含量。

对于 n 侧 OCL 区,将其与第 m 个准二维区合并为一个整体,则总的载流子来自第 $m-1$ 个势垒的扩散,总的载流子消耗包括复合消耗 R_{n-OCL} 、量子阱捕获以及扩散电流输出 I_{Dout} ,等效电路方程为

$$V_{n-OCL} \frac{dv_{n-OCL}}{dt} = I_{Dm} - I_{r_{n-OCL}} - I_{cm} + I_{em} - I_{Dout}, \quad (4)$$

式中, $v_{n-OCL} = qn_{n-OCL}$ 为电容项的等效节点电压。

在研究器件性能及腔体设计时,还需将载流子速率方程与光子速率方程联立分析。对应的光学支路的

等效电路方程为

$$V_w \frac{dv_s}{dt} = I_{st} + I_{sp} - \frac{v_s}{R_{ph}}, \quad (5)$$

式中: $I_{st} = \sum_{j=1}^m \Gamma_j I_{st,j}$ 为受激辐射项,其中, Γ 为 OCL 因子; $I_{sp} = \sum_{j=1}^m \Gamma_j qV_w \beta_{sp,j} B_{w_j} n_{w_j}^2$ 为自发辐射项,其中, β_{sp} 为自发辐射系数, B_{w_j} 为第 j 个量子阱区的自发辐射复合系数; $R_{ph} = \frac{\tau_{ph}}{V_w}$ 为一个电阻项,其中, $\tau_{ph} = \frac{\bar{n}_g}{c \left[\alpha_{int} - \frac{\ln(R_R R_L)}{2L} \right]}$ 为光子寿命 (\bar{n}_g 为群折射率, c 为光速, α_{int} 为腔损耗, L 为腔长, R_L 和 R_R 分别为左右端面反射率)。

为直接获得激光器左、右两端面的输出功率 P_L 、 P_R ,将光学支路节点所对应的电压 v_s 表征的谐振腔内产生的光子数进行变换,以便直接在模型输出端检测光功率^[18],具体变换过程为

$$\begin{cases} P_L = \frac{hc^2 WD (R_L - 1) \ln(R_L R_R)}{2q\bar{n}_g \lambda \left[1 - R_L + \sqrt{R_L/R_R} (1 - R_R) \right]} v_s \\ P_R = \frac{hc^2 WD (R_R - 1) \ln(R_L R_R)}{2q\bar{n}_g \lambda \left[1 - R_R + \sqrt{R_R/R_L} (1 - R_L) \right]} v_s \end{cases}, \quad (6)$$

式中: h 为普朗克常数; λ 为真空中波长; D 为有源区和 OCL 区的总厚度; W 为有源区宽度。

以上方程中的复合项表征的是自发辐射复合和非辐射复合对载流子的消耗,自发辐射复合和非辐射复合在有源区和非有源区均会发生。对于非辐射复合,其主要产生机制包括 SRH (shockley-read-hall) 复合以及俄歇复合。俄歇复合中,从能带到束缚态的跃迁过程对复合速率的贡献与载流子密度的平方成正比,能带间的俄歇碰撞电离过程对复合速率的贡献与载流子密度的三次方成正比。则总的复合速率记为

$$R_{nr+sp} = An + Bn^2 + Cn^3, \quad (7)$$

式中: A 为电子的 SRH 衰变速率; B 为自发辐射复合系数; C 为俄歇复合系数。

最后,考虑芯片的寄生参数(并联电容 C_s 、串联电阻 R_s 、并联电阻 R_d)和封装寄生参数(封装寄生电阻 R_p 、电感 L_p 和电容 C_p),将这种寄生网络与理想的激光器相结合,最终建立的完整的多量子阱激光器等效电路模型如图 2 所示。其中,注入本征区的电流 I_j 可用二

极管方程等效,即 $I_j = I_s \left[\exp\left(\frac{V_D}{\eta V_T}\right) - 1 \right]$, 式中: I_s 为二极管反向饱和电流; V_D 为电流源正向端电压; η 为理想因子; $V_T = \frac{kT}{q}$ (k 为玻尔兹曼常数, T 为开氏温度)。

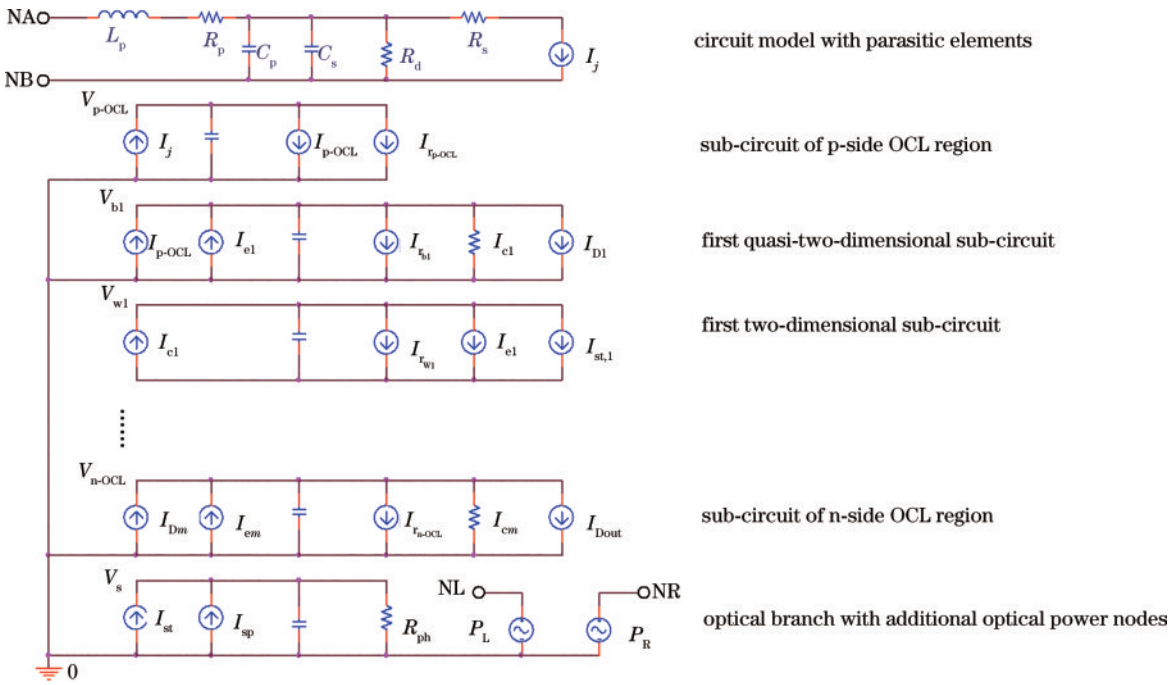


图 2 多量子阱激光器等效电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit model of a multi-quantum-well laser

3 脉冲驱动电路

脉冲激光主动探测技术需要在一定能量水平下,采用较短激光脉冲来提高时间分辨率以及信噪比^[19]。相应的脉冲激光驱动器可采用高速开关配合储能电路的方式来设计^[20-21],电路原理图如图 3 所示。

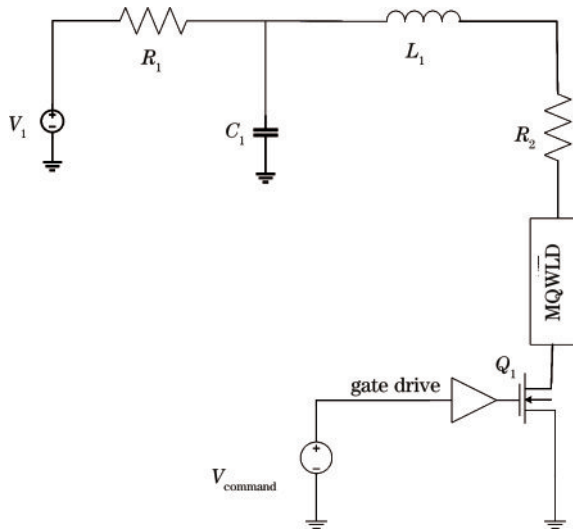


图 3 脉冲驱动电路原理图

Fig. 3 Schematic diagram of pulse drive circuit

图 3 中: Q_1 为高速开关器件; MQWLD 为建立的多量子阱半导体激光器等效电路模型。MQWLD 作为具备实际器件特性参数的有效负载接入驱动电路,以模拟激光器的光电转换特性,直接获得激光脉冲输出。驱动电路工作过程为:当开关 Q_1 截止时,电容 C_1

由恒压源 V_1 通过充电限流电阻 R_1 充电,为产生脉冲电流储存能量;当驱动脉冲信号 V_{command} 到来、开关 Q_1 导通时,电容 C_1 通过激光器负载快速放电,瞬间产生的脉冲电流驱动激光器发光。此激光驱动器的特点是具有稳定的脉冲输出,可以通过 V_1 值设置脉冲能量^[22]。

电容充电时间常数 τ_{chrg} 和谐振周期 t_{res} 为

$$\tau_{\text{chrg}} = R_1 C_1, \quad (8)$$

$$t_{\text{res}} = 2\pi \sqrt{L_1 C_1}, \quad (9)$$

通常 $\tau_{\text{chrg}} \gg t_{\text{res}}$ 。谐振特性阻抗 R_0 和脉冲宽度 t_w 为

$$R_0 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}, \quad (10)$$

$$t_w = \frac{t_{\text{res}}}{3}. \quad (11)$$

激光器峰值电流为

$$I_{\text{LDpk}} = \frac{V_1 - V_{\text{LDF}}}{R_0}, \quad (12)$$

式中, V_{LDF} 为激光器压降。

根据式(8)~(12)可得:

$$V_1 = \frac{2\pi L_1}{3t_w} I_{\text{LDpk}} + V_{\text{LDF}}, \quad (13)$$

$$C_1 = L_1 \left(\frac{I_{\text{LDpk}}}{V_1 - V_{\text{LDF}}} \right)^2. \quad (14)$$

脉冲激光发射模块的关键参数是输出脉冲功率及脉冲宽度。根据激光脉冲所需的 I_{LDpk} 和 t_w , 利用式(13)、(14)即可计算驱动电路的电压值 V_1 和储能电容值 C_1 。

4 仿真及讨论

4.1 激光器结构参数对输出激光脉冲的影响

为适应高脉冲工作模式以提高激光发射模块性能,对激光器进行结构参数分析及优化。利用 SPICE 软件对建立的激光器模型进行实际脉冲驱动电路下的瞬态特性仿真。获得的不同腔长及不同有源区宽度下的输出激光脉冲分别如图 4、5 所示。

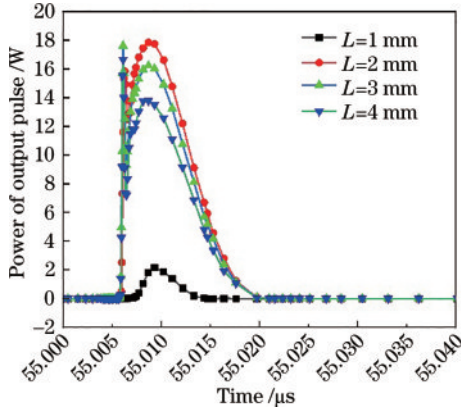


图 4 不同腔长下的输出激光脉冲波形

Fig. 4 Output laser pulse waveforms under different cavity lengths

从图 4 中可以看出:在腔长从 1 mm 增加至 4 mm 的过程中,输出激光的脉冲幅值变化较大,且并非线性;当腔长取 1 mm 时,输出激光的脉冲峰值功率仅有 2 W;当腔长增加至 2 mm 时,输出激光的脉冲峰值功率大幅提升至 18 W;继续增加腔长至 3、4 mm,输出激

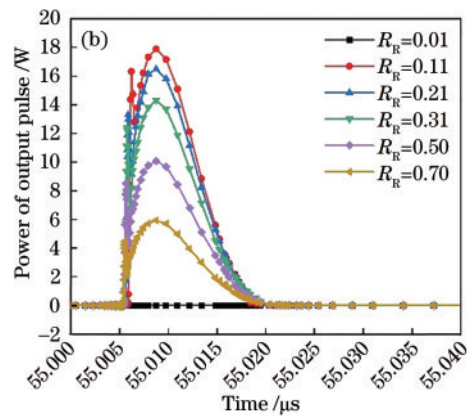
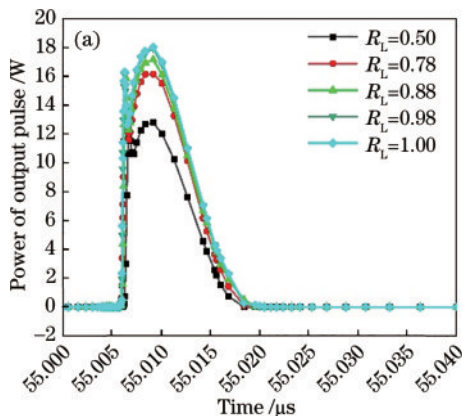


图 6 不同端面反射率下的输出激光脉冲波形。(a)左端面;(b)右端面

Fig. 6 Output laser pulse waveforms at different optical facet reflectivity values. (a) Left optical facet; (b) right optical facet

理想状态下,激光器谐振腔左端面的反射率应该为 1,这样可以为激光振荡提供有效反馈,如图 1(c)所示。如果反射率下降,如图 6(a)所示,输出激光脉冲峰值功率必然也随之下降。对于谐振腔右端面反射率,从图 6(b)中可以看出,右端面反射率从 0.01 增加到 0.11,输出激光脉冲峰值功率提升,但是继续增大右端面反射率,峰值功率会出现反比变化,说明对于右端面

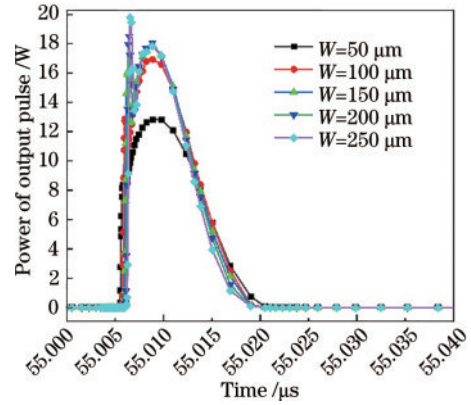


图 5 不同有源区宽度下的输出激光脉冲波形

Fig. 5 Output laser pulse waveforms with different widths of active region

光的脉冲峰值功率不升反降,说明腔长并非越大越好,而是有一个最优取值能够平衡增益和损耗。

从图 5 中可以看出,在有源区宽度从 50 μm 增加至 250 μm 的过程中,输出激光的峰值功率发生如下变化:当有源区宽度仅为 50 μm 时,输出激光脉冲峰值功率为 13 W;随着有源区宽度增加,输出激光脉冲峰值功率提高,当有源区宽度为 100 μm 时,输出激光脉冲峰值功率提高至 17 W;当有源区宽度为 150 μm 时,输出激光脉冲峰值功率少量提升至 18 W;继续增加有源区宽度,输出激光脉冲峰值功率不再增加,而瞬态峰值弛豫现象却会越来越突出。

激光器两端面反射率对输出激光的影响如图 6 所示。

的镀膜,需要考虑其最优值,以达到最优反馈平衡。

影响输出激光脉冲峰值功率的还有腔损耗,如图 7 所示,显然,损耗越小,峰值功率越大。在进行长腔长的高功率高效率激光器设计时,需要着重降低腔损耗,如对于 4 mm 的长腔长器件,腔损耗需要小于 0.5 cm^{-1} 。

激光的峰值弛豫振荡会受到模型中的增益压缩因子以及自发辐射系数的影响,具体情况如图 8 所示。

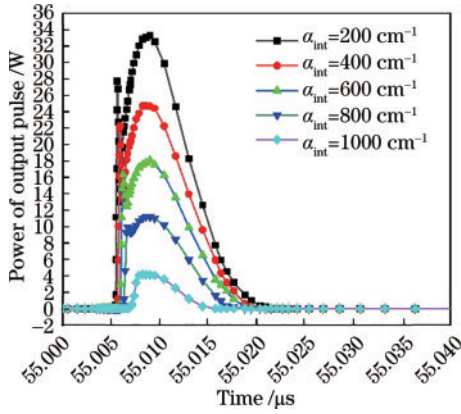


图 7 不同腔损耗下的输出激光脉冲波形

Fig. 7 Output laser pulse waveforms at different cavity losses

从图 8 中可以看出,自发辐射系数越小,峰值弛豫振荡越严重。自发辐射系数是表征随机辐射能够耦合

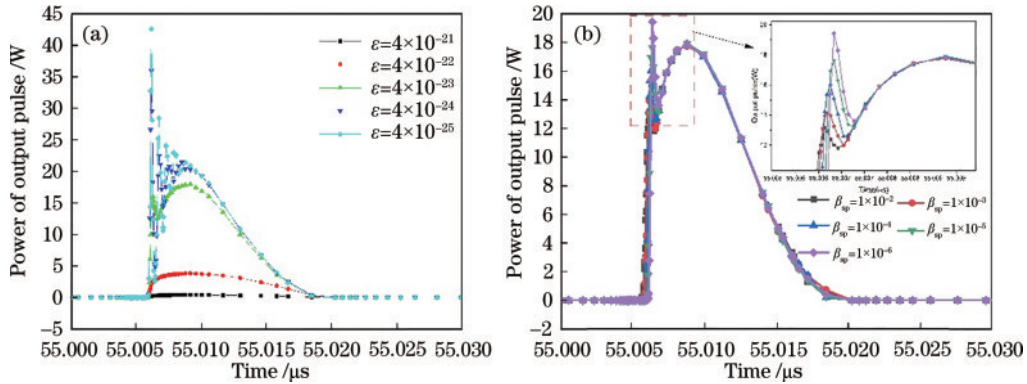


图 8 不同增益压缩因子及自发辐射系数的输出激光脉冲波形。(a)不同增益压缩因子;(b)不同自发辐射系数

Fig. 8 Output laser pulse waveforms for different gain suppression factors and spontaneous emission factors. (a) Different gain suppression factors; (b) different spontaneous emission factors

4.2 寄生参量对输出激光脉冲的影响

在激光峰值电流 $I_{LDpk}=30$ A、脉冲宽度 $t_w=30$ ns 条件下,预估 TO9(transistor outline 9)封装形式的电感为 20 nH,则根据式(13)计算得到所需电压 $V_1=62$ V,根据式(14)计算得到储能电容 $C_1=10$ nF。在此驱动电路参数下,获得的仿真结果如图 9 所示。可以看出,输入电流峰值 I_{LDpk} 达到 29.3 A、脉冲宽度 t_w 达到 31 ns,与计算值吻合,此时输出激光脉冲峰值功率为 19.4 W,脉冲宽度为 37 ns。

电感和电阻的值对脉冲电路的性能影响显著,图 10 为保持电路中其余参数不变,封装寄生电感 L_p 取 1、10、20 nH 时,激光器输入电流及输出激光脉冲的仿真波形图。随着 L_p 取值增大,输出激光脉冲峰值功率减小,脉冲宽度急剧增大。同样的分析方法及结论也适用于回路杂散电感。

图 11 为保持电路中其余参数不变,封装寄生电阻 R_p 取 0.1、0.5、1.0 Ω 时,激光器输入电流及输出激光脉冲的仿真波形图。随着 R_p 取值增大,输出激光脉冲峰值功率减小,脉冲宽度增大。同样的分析方法及结

论也适用于回路杂散电阻。进入受激辐射模式的光子数比例。设计良好的波导结构能够促使随机辐射耦合为受激辐射,从而一定程度上抑制峰值弛豫振荡。增益压缩因子是为了与实验结果一致而引入到增益项中的一个拟合修正量,增益压缩因子越大(有效引入),峰值弛豫振荡越缓。增益压缩因子与自发辐射系数具有相关性,自发辐射系数被认为是导致增益压缩的物理机制之一^[23]。

以上分析结果是根据等效电路分析法获得的。为提高脉冲激光发射模块的输出峰值功率,同时综合考虑后续器件的封装难度,最终使用有源区宽度为 90 μ m、腔长为 2 mm 的激光器芯片,右端面的最优反射率取 0.11。利用大于 50 μ m 的有源区宽度及大于 1 mm 的腔长进行芯片设计,有利于降低芯片在给定工作电流和功率下的结温,减小热阻、电阻,输出大的光功率^[24]。

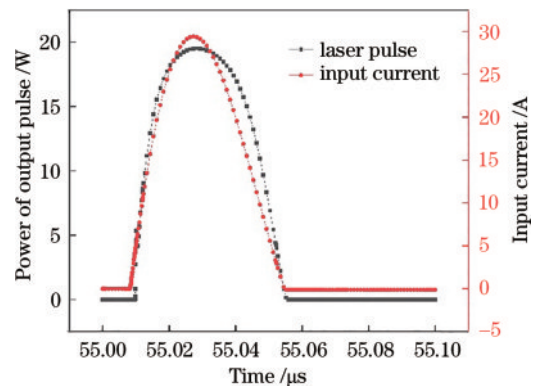


图 9 激光器输入电流和输出激光脉冲波形

Fig. 9 Waveforms of laser input current and output pulse

论也适用于回路杂散电阻。

仿真结果证明了激光器封装寄生参数和放电回路杂散参数的存在会严重影响输出激光脉冲的峰值功率和脉宽,电感的影响尤为显著。相比于通过分析激光器输入电流来推测输出激光脉冲的方法,加入实际激光器等效电路模型后的分析方法可以直接定量获得电路器件参数对激光脉冲的影响情况。

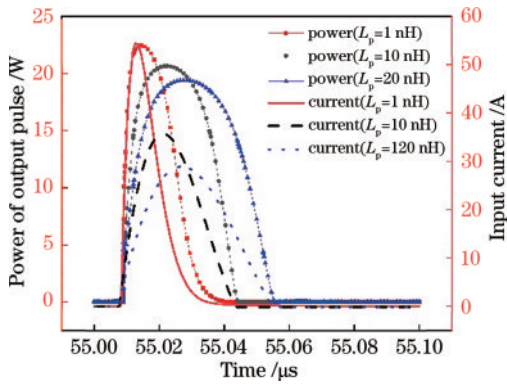


图 10 不同寄生电感的激光器输入电流与输出激光脉冲波形
Fig. 10 Waveforms of laser input current and output laser pulse for different package parasitic inductances

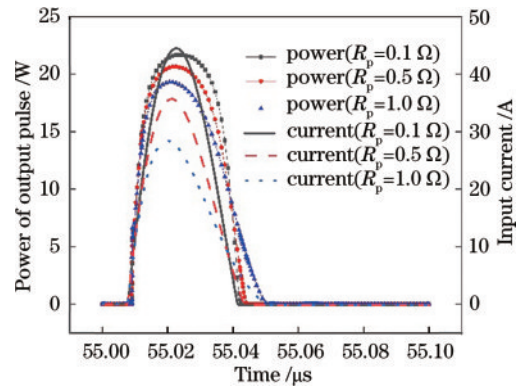


图 11 不同寄生电阻的激光器输入电流与输出激光脉冲波形
Fig. 11 Waveforms of laser input current and output laser pulse for different package parasitic resistances

5 测试结果

将经过结构参数(有源区宽度、腔长)及端面反射率优化的激光器接入实际制作完成的脉冲驱动电源进行激光脉冲测试,并将测试的结果同仿真的结果进行比较。测试分为两组,一组针对 TO9 封装激光器,一组针对 COB(chips on board)封装激光器。图 12 和图 13 为分别接入 TO9 封装激光器和 COB 封装激光器的发射模块在峰值电流为 30 A 时测试的激光器正极波形及激光脉冲波形。

TO9 封装激光器相比于 COB 封装激光器,输出激光脉冲宽度更大[TO9 封装激光器激光脉冲宽度为

41.6 ns,是 COB 封装激光器激光脉冲宽度(9.467 ns)的 4.4 倍],峰值功率更小(TO9 封装激光器激光脉冲峰值功率为 18.8 W,COB 封装激光器激光脉冲峰值功率为 21.2 W,后者增大了 12.8%),这与仿真分析结果一致。另外,从激光器正极波形的对比可知,在其他器件参数相同的情况下,要获得相同的峰值电流(30 A),寄生电感较小的激光发射模块所需的 V_1 更小[COB 封装激光器的 V_1 为 20.4 V,仅为 TO9 封装激光器(62.4 V)的 32.7%],这与式(15)的理论计算公式相符,此时的激光器功率转换效率较高。

产生以上输出激光特性差异的原因主要在于两种封装结构的寄生电感不同。COB 封装即板上芯片

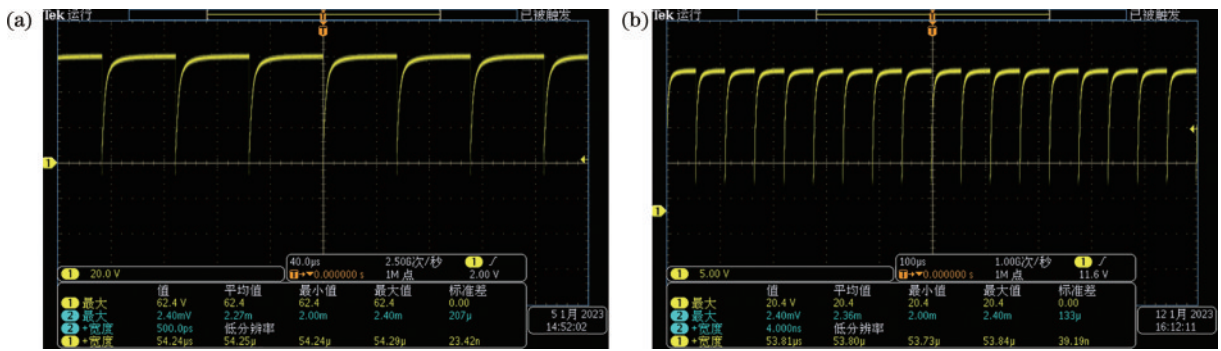


图 12 激光器正极波形。(a)TO9 封装激光器;(b)COB 封装激光器

Fig. 12 Waveforms of laser positive voltage. (a) Laser with TO9 package; (b) laser with COB package

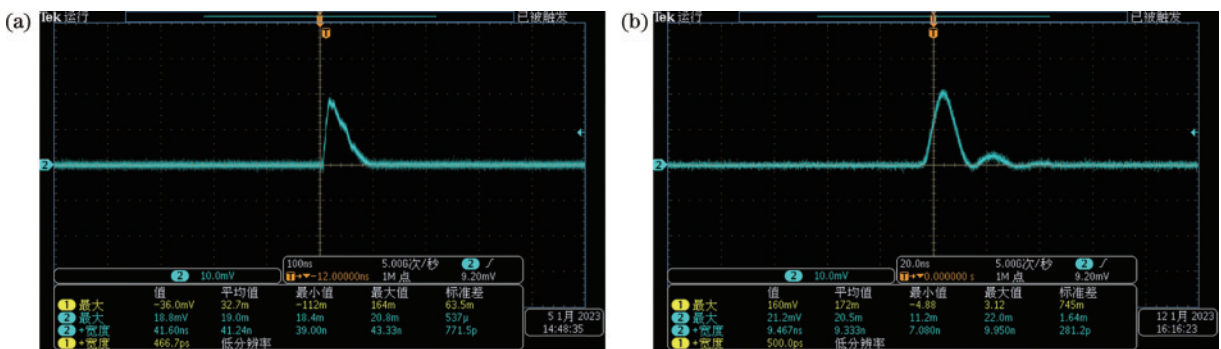


图 13 激光脉冲测试波形。(a)TO9 封装激光器;(b)COB 封装激光器

Fig. 13 Waveforms of laser pulse. (a) Laser with TO9 package; (b) laser with COB package

封装,激光器芯片用导电胶黏接在电路板焊盘上,再由金线键合,与另一内部电路板焊盘实现电连通;偏置电流通过外部电路板加电使得芯片发射激光,其寄生电感主要来自于金线。TO封装即同轴封装,激光器芯片烧结在过渡热沉上并与其一起黏接在内部平台上,再由金线键合,与另一内部引脚实现电连通;偏置电流通过外部电路加在芯片连接的同轴管脚上使得芯片发射激光,其寄生电感除了来自金线,还来自管脚。另外,由于COB封装中负极与电路板直接相连,可认为二者之间没有距离;而TO封装的负极还需通过金线、管脚与电路板相连,距离较大。最后,TO封装的体积相比COB封装更大,内部正极通过金线连接芯片再到负极,环路面积大。因此,TO9封装

激光器引入的寄生电感远大于COB封装激光器。

利用式(9)、(11),根据电路中的电容值 C_1 (10 nF)和输入电流脉宽 t_w (TO9封装激光器 31 ns, COB封装激光器 7 ns),可估算得到TO9封装激光器的寄生电感为 22 nH, COB封装激光器的寄生电感为 1 nH。对测试的TO9封装和COB封装激光器的电压-电流($V-I$)曲线进行线性拟合,提取出表征电阻的斜率,则得到TO9封装激光器的寄生电阻为 0.66 Ω , COB封装激光器的寄生电阻为 0.21 Ω 。基于以上数据,利用等效电路模型,对TO9封装和COB封装激光器的激光发射模块进行仿真,获得的激光脉冲波形与相应的实测波形对比如图14所示,相应的数据整理于表1中。

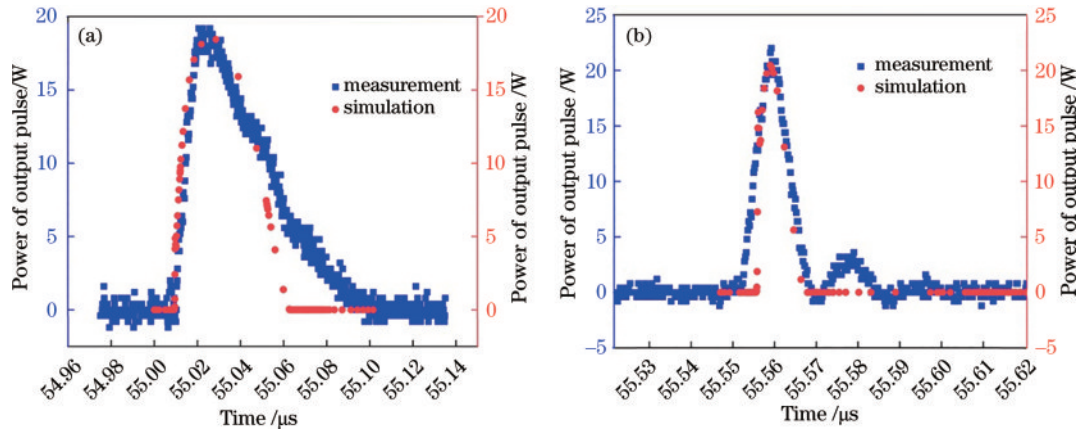


图 14 发射模块输出激光脉冲测试与仿真波形对比。(a)TO9封装激光器;(b)COB封装激光器
Fig. 14 Simulated and measured optical pulse waveforms of the laser transmitter module. (a) Laser with TO9 package; (b) laser with COB package

表 1 不同封装条件下的测试与仿真数据
Table 1 Measured and simulated data in different packaging conditions

	TO9		COB	
	Pulse width /ns	Peak power /W	Pulse width /ns	Peak power /W
Measured	41.6	18.8	9.5	21.2
Simulated	38.2	18.6	7.2	20.8

从以上实测与仿真结果的对比可得出结论:对激光器进行恰当的等效电路建模,可以有效地反映出激光器的光电转换特性,将其作为发射电路的有效负载,进行发射模块的设计与分析,可以提升发射模块输出高功率、窄脉冲激光的性能。

6 结 论

利用速率方程建立多量子阱激光器等效电路模型,将此模型引入脉冲驱动电路,利用SPICE软件对激光器的发射模块进行仿真,可以直接得到激光器芯片参数及寄生参数对输出激光脉冲的影响情况。利用设计制作完成的激光发射模块对两种封装的1550 nm半导体激光器进行脉冲测试,测试结果与仿真结果一致。由于半导体激光器与电路仿真软件的兼容性,其等效电路模型可

广泛应用于评价及优化其在各种光电应用中的性能。

参 考 文 献

- [1] Mao X S, Inoue D, Kato S, et al. Amplitude-modulated laser radar for range and speed measurement in car applications[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13(1): 408-413.
- [2] Carmer D C, Peterson L M. Laser radar in robotics[J]. Proceedings of the IEEE, 1996, 84(2): 299-320.
- [3] Schwarz B. Mapping the world in 3D[J]. Nature Photonics, 2010, 4(7): 429-430.
- [4] Fürstenberg K, Ahlers F. Development of a low-cost automotive laser scanner-the EC Project MiniFaros[M]// Meyer G, Valldorf J. Advanced microsystems for automotive applications 2011. Heidelberg: Springer, 2011: 149-158.
- [5] Coffey V C. Imaging in 3-D: killer apps coming soon to a

- device near you[J]. *Optics and Photonics News*, 2014, 25(6): 36-43.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 激光产品的安全 第 14 部分: 用户指南: GB/T 7247.14—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Administration Standardization. Safety of laser products-Part 14: a users guide: GB/T 7247.14—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- [7] 常津源, 熊聪, 祁琼, 等. 1550 nm 高功率基横模半导体激光器及温度特性[J]. *光学学报*, 2023, 43(7): 0714003.
Chang J Y, Xiong C, Qi Q, et al. 1550 nm high-power fundamental transverse mode semiconductor laser and its temperature characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(7): 0714003.
- [8] 王振. 1550 nm 大功率半导体脉冲激光器研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018: 2-4.
Wang Z. Study on 1550 nm high power semiconductor pulsed laser[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018: 2-4.
- [9] Lowery A J, Gurney P C R, Wang X H, et al. Time-domain simulation of photonic devices, circuits, and systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 1996, 2693: 624-635.
- [10] Bae H J, Cho J H, Sung H K. Modulation performance enhancement of directly modulated injection-locked semiconductor lasers using an equivalent electrical circuit[J]. *Electronics*, 2021, 10(19): 2409.
- [11] Morishita M, Ohmi T, Nishizawa J I. Impedance characteristics of double-hetero structure laser diodes[J]. *Solid-State Electronics*, 1979, 22(11): 951-962.
- [12] Esquivias I, Weisser S, Romero B, et al. Carrier dynamics and microwave characteristics of GaAs-based quantum-well lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1999, 35(4): 635-646.
- [13] Javro S A, Kang S M. Transforming Tucker's linearization laser rate equations to a form that has a single solution regime[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, 13(9): 1899-1904.
- [14] Horri A, Faez R. Large signal analysis of double quantum well transistor laser[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2013, 45(5): 389-399.
- [15] Shen C C, Hsu T C, Yeh Y W, et al. Design, modeling, and fabrication of high-speed VCSEL with data rate up to 50 Gb/s[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2019, 14(1): 276-281.
- [16] 陈洋, 王伟. 基于寄生网络的垂直腔面发射激光器频响特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(5): 0514005.
Chen Y, Wang W. Frequency response characteristics of vertical-cavity surface emitting lasers based on parasitic network[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(5): 0514005.
- [17] 刘谈平, 王召巴. 包含寄生参数的大功率半导体激光器等效电路模型[J]. *中北大学学报(自然科学版)*, 2014, 35(6): 750-756.
Liu T P, Wang Z B. High-power semiconductor laser equivalent circuit model with parasitic parameter[J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2014, 35(6): 750-756.
- [18] 陈维友. 光电子器件模型与 OEIC 模拟[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 204-253.
Chen W Y. Optoelectronic devices circuit model and the circuit-level simulation of OEIC[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001: 204-253.
- [19] Kostamovaara J, Huikari J, Hallman L, et al. On laser ranging based on high-speed/energy laser diode pulses and single-photon detection techniques[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(2): 7800215.
- [20] 王金塔, 姚宏宝, 刘子星. 高功率窄脉冲激光发射电路分析[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(6): 1049-1054.
Wang J H, Yao H B, Liu Z X. Analysis of laser emitting circuit with high-power and short-pulse[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1049-1054.
- [21] 杜建艳, 赵毅强, 叶茂, 等. 窄脉宽大电流半导体激光器驱动电路研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(1): 0114008.
Du J Y, Zhao Y Q, Ye M, et al. Study on driving circuit of narrow pulse width and large current semiconductor laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(1): 0114008.
- [22] John S G. eGaN FETs for lidar-getting the most out of the EPC9126 laser driver[EB/OL]. Efficient Power Conversion Corporation, 2021, 1-11[2023-04-27]. https://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/application-notes/AN027%20Getting-the-Most-out-of-eGaN-FETs.pdf?ver=Az_Xf5LFEA0Rs1IjVKwYDQ%3d%3d
- [23] Rajabi K, Wang L, Hao Z, et al. Numerical study of transient oscillation in gain-switched in GaN-based laser diodes[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(6): 1-6.
- [24] Bean D M, Qian Y, Pulver D E. High-power infrared semiconductor diode light emitting device: US7701991[P]. 2010-04-20.