

# 封装对大功率 VCSEL 窄脉冲发光特性的影响

颜颖颖<sup>1,2</sup>, 陈志文<sup>1,2</sup>, 邱剑<sup>1,2\*</sup>, 刘克富<sup>1,2</sup>, 张建伟<sup>3</sup>

<sup>1</sup>复旦大学先进照明技术教育部工程研究中心, 上海 200433;

<sup>2</sup>复旦大学信息科学与工程学院光源与照明工程系, 上海 200433;

<sup>3</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033

**摘要** 相比传统边发射激光器, 垂直腔面发射激光器(VCSEL)光束质量高、可靠性高, 在激光雷达测距(LiDAR)领域有广泛的应用前景。主要研究直插式 TO(transistor outline)封装 VCSEL 和裸芯片 VCSEL 在窄脉冲大电流条件下的发光特性, 通过 Pspice 参数扫描分析结合实验结果和理论计算, 比较了两种封装激光器的杂散参数大小, 并分析了其对激光器发光特性的影响。推导出了脉冲条件下 VCSEL 的功率转换效率公式, 并分析了杂散参数对 VCSEL 功率转换效率的影响。

**关键词** 激光光学; 垂直腔面发射激光器; 激光雷达测距; 窄脉冲; 高功率

中图分类号 TN29

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0814001

## Effect of Package on Luminescence Characteristics of High-Power VCSEL with Narrow Pulse

Yan Yingying<sup>1,2</sup>, Chen Zhiwen<sup>1,2</sup>, Qiu Jian<sup>1,2\*</sup>, Liu Kefu<sup>1,2</sup>, Zhang Jianwei<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Engineering Research Center of Advanced Lighting Technology, Ministry of Education, Fudan University, Shanghai 200433, China;

<sup>2</sup>Department of Light Sources and Illuminating Engineering, School of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China;

<sup>3</sup>State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** The vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) offers higher beam quality and reliability compared with the traditional edge emitting laser. It has significant application prospects in light imaging detection and ranging (LiDAR). The luminescence characteristics of a VCSEL with TO (transistor outline) package and a VCSEL with bare chip are examined under the narrow pulse and large current conditions. Using Pspice parameter scanning analysis, the experimental results combined with the theoretical calculation are used to compare the sizes of stray parameters and to analyze their effects on the luminescence characteristics of these two encapsulated lasers. Moreover, the formula about power conversion efficiency of a VCSEL under the pulse condition is derived and the influence of stray parameters on the power conversion efficiency of a VCSEL is analyzed.

**Key words** laser optics; vertical cavity surface emitting laser; LiDAR; narrow pulse; high power

**OCIS codes** 140.7260; 140.3538; 140.3460

## 1 引 言

垂直腔面发射激光器(VCSEL)相比边发射激光器有多项优点: 光束质量高, 光束发散角小, 出射的圆形光斑利于光纤耦合; 可靠性高, 不受光学灾变损伤影响, 波长相对温度漂移低(约 0.065 nm/C, 边

发射激光器 0.3 nm/C<sup>[1]</sup>); 光束垂直电极出射, 可以直接进行芯片级二维 VCSEL 阵列集成, 提高输出功率。国际上 Trilumina 公司单个 910 nm 波段 VCSEL 阵列在 100 A 电流驱动下输出激光功率约为 16 W<sup>[2]</sup>。国内中国科学院长春光学精密机械与物理研究所单个 910 nm 波段 VCSEL 阵列在 70 A

收稿日期: 2019-11-11; 修回日期: 2019-12-14; 录用日期: 2020-01-06

基金项目: 复旦大学-长春光学精密机械与物理研究所联合基金(FC2017-002)、战略火箭创新基金(Y18112)

\* E-mail: jqiu@fudan.edu.cn

电流驱动下功率达  $25.5 \text{ W}^{[3]}$ , 单个  $980 \text{ nm}$  波段 VCSEL 阵列在  $95 \text{ A}$  电流驱动下输出功率达  $62 \text{ W}^{[4]}$ 。VCSEL 阵列的优点使其在各个领域都有极高的应用价值, 如光通信<sup>[5-6]</sup>、3D 成像<sup>[7]</sup>, 特别是激光雷达测距(LiDAR)<sup>[8-9]</sup>。

基于飞行时间测距法(TOF)的 LiDAR 系统的测距原理是通过驱动产生窄脉冲大电流, 进而驱动激光器产生光脉冲照射被测物体, 部分激光被反射后被探测器接收<sup>[10]</sup>, 通过计算激光从发射到接收的时间差, 得到被测物体的距离。为了保证系统的测距精度足够高, LiDAR 输出的激光脉宽范围是  $1 \sim 25 \text{ ns}$ ; 峰值电流最好能达到百安培量级, 这样才能保证激光脉冲上升沿足够快, 此时回路中的电感  $L_0$  对脉冲电路的性能影响显著<sup>[8]</sup>。对于上升沿只有几纳秒的脉冲电流, 即使是几百皮亨的电感就足以对脉冲电流波形产生极大影响, 脉宽越窄,  $L_0$  的影响越显著<sup>[11]</sup>。在减小回路电感方面, TI 公司<sup>[12]</sup> 将放电回路分为两条完全对称的回路, 将  $L_0$  减小为单路的  $1/2$ 。Reusch 等<sup>[13]</sup> 通过减小回路长度、磁通量自抵消, 将  $L_0$  减小  $40\%$ 。Wens 等<sup>[14]</sup> 将开关与其前置驱动集成在一起, 获得  $2.2 \text{ ns}$  脉冲电流上升沿。在电路中杂散电感得到最大程度优化的条件下, 由于激光器不同封装类型引入的电感大小不同<sup>[15]</sup>, 器

件的封装是需要重点关注的部分。

本文以 TO(transistor outline)封装 VCSEL 和裸芯片 VCSEL 为例, 通过仿真及实验比较了不同封装 VCSEL 在窄脉冲大电流条件下的发光特性。目前多数文献中研究的是 VCSEL 的直流<sup>[16]</sup>或准直流<sup>[7]</sup>特性, 但对大功率脉冲条件下 VCSEL 特性和功率转换效率研究较少。通过直流功率转换效率公式, 得到脉冲条件下 VCSEL 功率转换效率公式, 并对比两种封装对 VCSEL 脉冲的功率转换效率的影响。

## 2 激光器及驱动电路简介

所使用的是长春光学精密机械与物理研究所提供的高功率、高效率 VCSEL 阵列, 如图 1 所示。该阵列含有 16 个间隔为  $150 \mu\text{m}$ , 出光孔径为  $150 \mu\text{m}$  的发光单元; 有源区包含 3 个  $\text{In}_{0.2}\text{GaAs}/\text{GaAs}_{0.92}\text{P}$  应变量子阱, 发射波长为  $980 \text{ nm}$ ; 有源区上下两侧是分布式布拉格反射镜(DBR), 由  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$  材料以  $1/4$  光学波长的厚度反复堆叠组成; 底层 DBR 包含 28 层反射镜, 顶层 DBR 包含 30 层反射镜; 在 P 型 DBR 与有源层间有一层选择性氧化的限制层, 由  $30 \text{ nm}$  厚的高铝材料  $\text{AlAs}$  构成, 用于限制电流和光场。

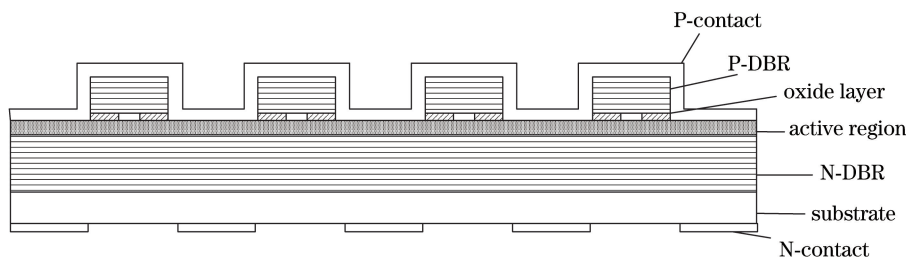


图 1 VCSEL 阵列的横截面示意图

Fig. 1 Cross-sectional diagram of VCSEL array

裸芯片 VCSEL 如图 2 所示, VCSEL 通过若干金线与焊盘直接建立电气连接。TO 封装 VCSEL 如图 3、4 所示。基板被分为两部分, 其中一部分通过焊料与 VCSEL 底部电极直接贴合, 另一部分通过金线与 VCSEL 顶部电极建立电气连接, 基板的两部分再通过金线键合分别与两个引脚建立电气连接。对比二者, TO 封装 VCSEL 中的金线、基板及引脚会引入一定杂散参数。

驱动电路的简化图<sup>[17-18]</sup>如图 5 所示, 为了使输出激光在脉宽为  $25 \text{ ns}$  时有较高的功率, 放电电容  $C$  取  $10 \text{ nF}$ 。  $M_1$  为开关,  $R_1$  为  $1 \text{ k}\Omega$  的限流电阻,  $L_x$  为回路杂散电感,  $R_x$  为回路杂散电阻。VCSEL

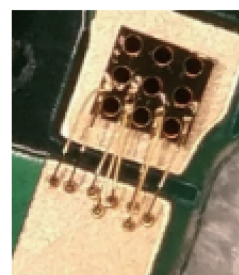


图 2 裸芯片 VCSEL 实物图

Fig. 2 Photograph of VCSEL with bare chip

等效电路模型<sup>[19-20]</sup>中  $R_c$  代表芯片电阻,  $C'$  代表结电容,  $R_s$  代表封装引入电阻,  $L_s$  代表封装引入电感。由于结电容为  $\text{pF}$  量级, 主要影响 VCSEL 的反

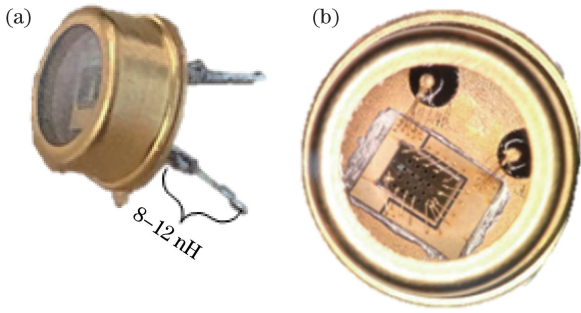


图 3 TO 封装 VCSEL 实物图。(a)侧面图;(b)俯视图

Fig. 3 Photograph of VCSEL with TO package.

(a) Side view; (b) top view

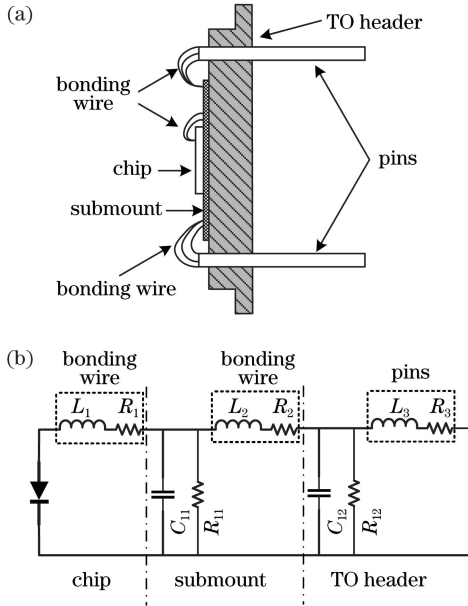


图 4 TO 封装 VCSEL。(a)结构示意图;(b)等效电路图

Fig. 4 VCSEL with TO package. (a) Diagram of configuration; (b) equivalent circuit

向特性,而本文主要关注 VCSEL 正向发光特性,因此在仿真和理论分析部分将结电容忽略。

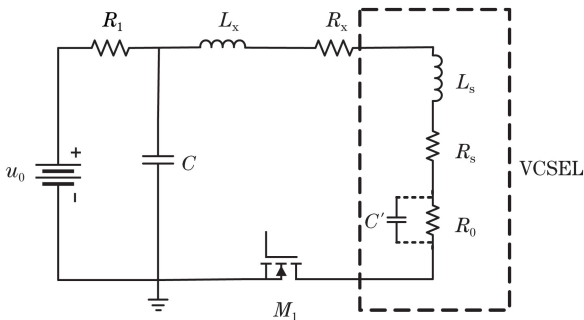


图 5 驱动电路简化示意图

Fig. 5 Simplified diagram of drive circuit

印制电路板(PCB)简化图如图 6 所示,主要通过三种方法来减小回路电感: $M_1$  使用的是 GaN System 公司的 GaN 开关 GS61008P, GaN 开关速

度快,采用芯片级封装;放电回路通过孔垂直于电路板平面,顶层和底层的电流流向相反,磁通量相互抵消;PCB 厚度为 0.8 mm,减小了放电回路长度。通过测量负载短路时回路电流的振荡周期,计算到  $L_x$  数值约为 1.7 nH,  $R_x$  数值约为 0.08  $\Omega$ 。

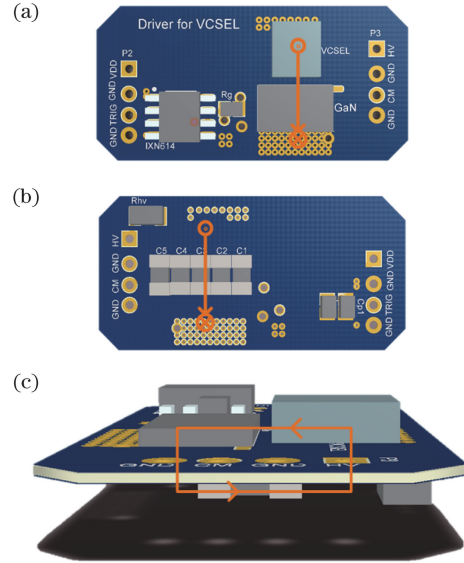


图 6 PCB 简化示意图。(a)俯视图;

(b)仰视图;(c)侧视图

Fig. 6 Simplified diagram of PCB. (a) Top view;

(b) bottom view; (c) side view

电路工作时,首先将开关断开,电源通过限流电阻对电容进行充电,接着开关在较长一段时间内保持闭合,电容在此期间完全放电,可以近似为电阻电感电容(RLC)串联二阶电路。该电路的特点是:回路中的杂散电感是电路组成不可或缺的一部分;光脉冲脉宽取决于电容值,因此脉冲驱动宽度可以大于光脉宽;可以通过提高电容初始充电电压来减小电容值,得到高功率窄脉宽的光脉冲。

### 3 电路仿真及结果讨论

由于驱动电路可以近似为 RLC 串联二阶电路,根据 RLC 放电回路结构,列出回路方程:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt = u_0, \quad (1)$$

式中: $L$  和  $R$  是回路的总电感和总电阻; $u_0$  是电容上的初始电压。一般脉冲电路参数满足  $R < 2\sqrt{L/C}$ , 电路处于欠阻尼振荡状态,振荡周期为

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}. \quad (2)$$

电流幅值为

$$I_{\max} = \frac{u_0}{\sqrt{\frac{L}{C} - \frac{R^2}{4}}} \quad (3)$$

VCSEL 两端电压与电流关系为

$$\dot{U} = I_{\max} Z e^{-\frac{R}{2L}t} \sin(\omega t + \varphi), \quad (4)$$

$$\varphi = \arctan \frac{L_s}{R_s + R_0}, \quad (5)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad (6)$$

式中: $Z$  是 VCSEL 阻抗绝对值; $\varphi$  是电流电压的相位差。由(2)、(3)、(5)、(6)式可得,当封装引入的杂散电感和电阻增大时,脉冲电流的脉宽增大,幅值减小,同时电流与电压间的相位差增大。在不考虑探测器的精度下,LiDAR 系统理论的测距精度<sup>[14]</sup>为

$$\sigma_r \propto \frac{c}{2} \cdot t_{\text{rise}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{S}{N}}}, \quad (7)$$

式中: $t_{\text{rise}}$ 是激光脉冲的上升时间; $\sqrt{\frac{S}{N}}$ 是反射信号的信噪比,与激光功率成正比。为了提高 LiDAR 的测距精度,应使 $L_s$ 、 $R_s$  尽量小。以下通过 Pspice 仿真验证杂散电感  $L_s$  和杂散电阻  $R_s$  对放电回路的影响。

### 3.1 封装引入的杂散电感对放电回路的影响

图 7 为保持其余参数不变, $L_s$  取 0.5,5,10 nH 时,VCSEL 两端电压与电流仿真波形图。随着  $L_s$  取值增大,脉冲电流幅值减小,脉宽增大,反向电流值增大,VCSEL 两端电压与电流相位差增大。

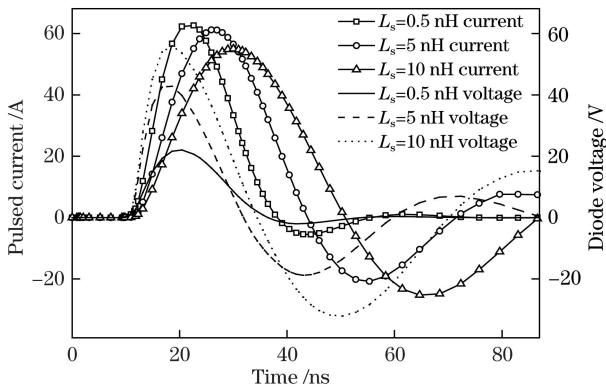


图 7  $L_s$  不同取值下 VCSEL 两端电压和电流仿真波形图 ( $C=10$  nF,  $V=90$  V)

Fig. 7 Voltage and current simulation waveforms at both ends of VCSEL with different  $L_s$  ( $C=10$  nF,  $V=90$  V)

### 3.2 封装引入的杂散电阻对放电回路的影响

图 8 为保持其余参数不变, $R_s$  取 0.3,0.5,0.8  $\Omega$

时,VCSEL 两端电压与电流仿真波形图。随着  $R_s$  取值的增大,脉冲电流幅值减小,脉宽增大,反向电流值减小, $R_s$  对 VCSEL 两端电压与电流相位差影响较小。

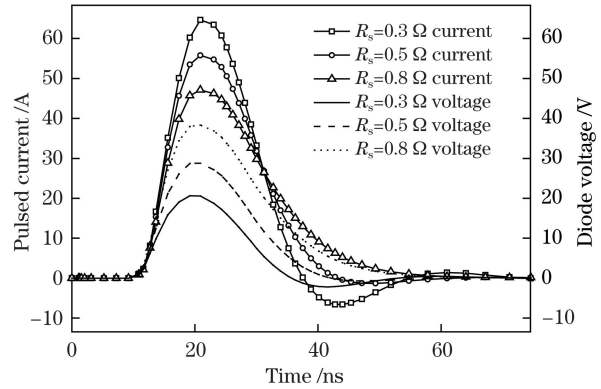


图 8  $R_s$  不同取值下 VCSEL 两端电压和电流仿真波形图 ( $C=10$  nF,  $V=90$  V)

Fig. 8 Voltage and current simulation waveforms at both ends of VCSEL with different  $R_s$  ( $C=10$  nF,  $V=90$  V)

仿真结果验证了回路中的杂散电感和杂散电阻的增大会减小脉冲电流幅值,增大脉宽。进一步推测,这些杂散参数将使发射的激光脉冲上升沿减缓,激光峰值功率减小。同时根据(7)式,这两项参数的变化会使 LiDAR 系统的测距精度减小。

## 4 不同封装的 VCSEL 阵列脉冲实验结果

通过实际电路实验对比 TO 封装和裸芯片 VCSEL 的电光转换效果,比较两种封装引入回路的杂散参数大小,验证杂散参数对激光器发光特性的影响。电路中放电主电容为 10 nF,充电电压范围为 30~90 V,回路电流通过对电容两端电压求导得到。

图 9 分别为在电压为 90 V 时 TO 封装和裸芯片 VCSEL 的两端电压和电流波形图,结合第 3 节理论及仿真分析可知,TO 封装 VCSEL 引入的寄生电感及电阻值较大,使得 VCSEL 两端电压和流过的电流有明显的相位差。同时,在相同电路参数情况下,TO 封装的 VCSEL 相对裸芯片 VCSEL 回路中的电流幅值小 (TO 封装 VCSEL 的峰值电流为 45 A,裸芯片 VCSEL 的峰值电流为 53 A,增长 17.8%)、脉宽长 (TO 封装 VCSEL 的脉宽为 25.5 ns,裸芯片 VCSEL 的脉宽为 19.8 ns,减少 22.4%)。电感对电流的影响直接导致前者发出的光

脉冲相对后者峰值功率小(TO封装 VCSEL 的峰值功率为 18 W,裸芯片 VCSEL 的峰值功率为 26.7 W,增长 48.3%)、脉宽长,如图 10 所示。

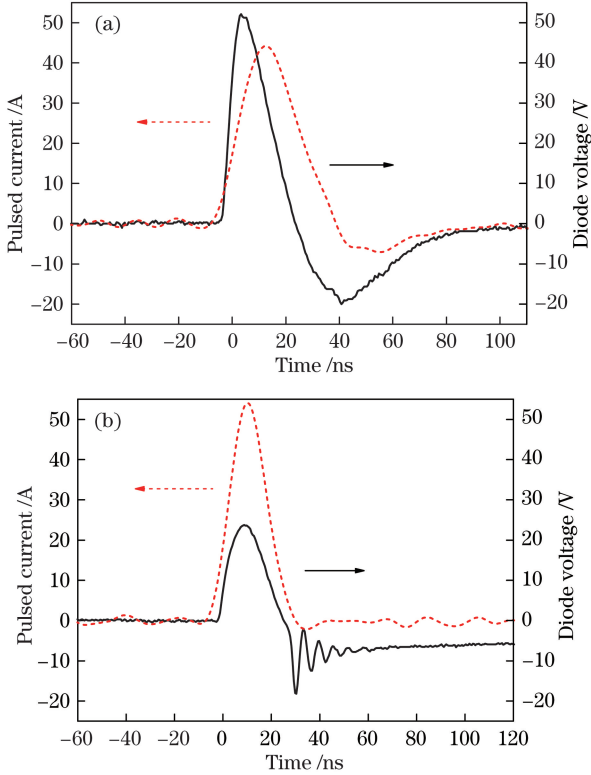


图 9 VCSEL 两端电压与电流脉冲波形图 ( $C=10\text{ nF}$ ,  $V=90\text{ V}$ )。(a) TO 封装 VCSEL; (b) 裸芯片 VCSEL

Fig. 9 Pulse waveforms of voltage and current at both ends of VCSEL ( $C=10\text{ nF}$ ,  $V=90\text{ V}$ ). (a) VCSEL with TO package; (b) VCSEL with bare chip

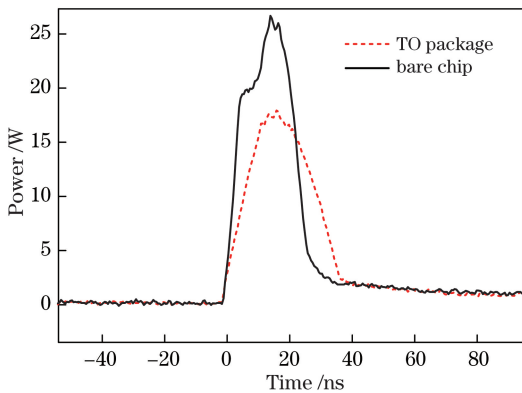


图 10 TO 封装 VCSEL 与裸芯片 VCSEL 的光脉冲波形图 ( $C=10\text{ nF}$ ,  $V=90\text{ V}$ )

Fig. 10 Optical pulse waveforms of VCSEL with TO package and VCSEL with bare chip ( $C=10\text{ nF}$ ,  $V=90\text{ V}$ )

根据图 9 得到 TO 封装和裸芯片 VCSEL 回路的振荡周期  $T$  分别为 85 ns 和 60 ns,TO 封装 VCSEL 两端电压电流相位差约为  $(1/25)\pi$ 。根据图 11 曲线拟合得到裸芯片 VCSEL 的电压-电流曲线斜率为  $0.33\ \Omega$ ,TO 封装 VCSEL 的电压-电流曲线斜率为  $1\ \Omega$ 。将参数代入(2)、(5)式进行初步估算,结合实际电路波形进行参数微调后,得到当电路  $L_x=1.775\text{ nH}$ , $R_x=0.15\ \Omega$ , $R_{s1}+R_0=0.33\ \Omega$ , $L_{s1}=0.4\text{ nH}$ , $R_{s2}+R_0=0.88\ \Omega$ , $L_{s2}=11.36\text{ nH}$  时,仿真与实验波形的对比,如图 12 所示。

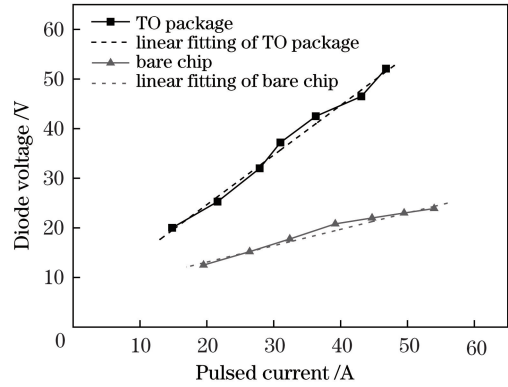


图 11 TO 封装 VCSEL 和裸芯片 VCSEL 的峰值电流与峰值电压关系图

Fig. 11 Relationship between peak current and peak voltage for VCSEL with TO package and VCSEL with bare chip

基于以上分析,TO 封装 VCSEL 相对裸芯片 VCSEL,杂散参数中杂散电感占主要部分,约为 11 nH,杂散电阻次之,约为  $0.55\ \Omega$ 。

杂散参数除了影响回路脉冲电流幅值脉宽,还会影响 VCSEL 的功率转换效率。

根据文献[21],有

$$P_{\text{out}} = \eta_e (\hbar\nu/q) (I - I_{\text{th}}), \quad (8)$$

$$V(I) = V_0 + IR_D, \quad (9)$$

$$\eta_c(I) = \eta_e (\hbar\nu/q) [(I - I_{\text{th}})/I(V_0 + IR_D)], \quad (10)$$

$$\eta_c(I) = \frac{P_{\text{out}}(I)}{V(I) \cdot I}, \quad (11)$$

式中: $P_{\text{out}}$ 是输出光功率; $\hbar\nu$ 是光子能量; $q$ 是电子电荷量; $\eta_e$ 是外部差分量子效率; $I_{\text{th}}$ 是阈值电流; $V_0$ 是导通电压, $R_D$ 是二极管的串联电阻, $\eta_c$ 是功率转换效率。在脉冲情况下,电流、电压、光功率是以脉冲形式出现的,无法以某一固定值表示,因此将(11)式中分子分母同时对时间  $t$  进行积分,得到

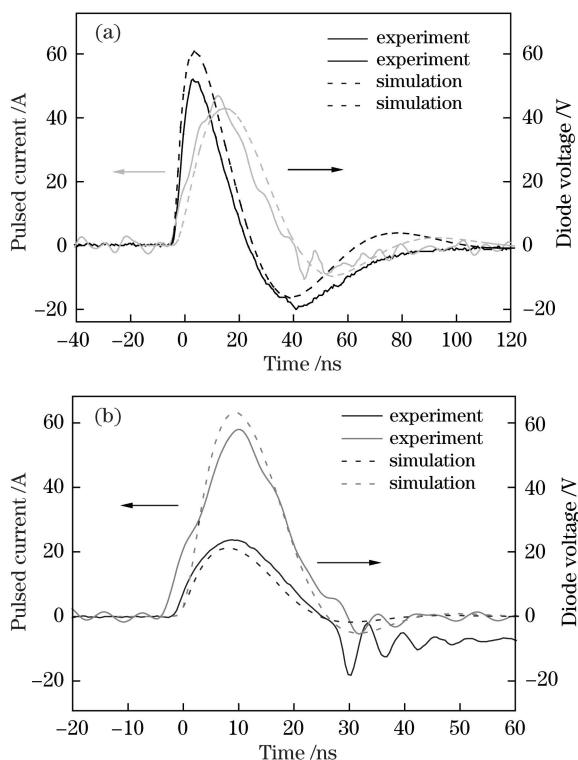


图 12 仿真与实验波形对比。(a) TO 封装 VCSEL;  
(b) 裸芯片 VCSEL

Fig. 12 Comparison of simulated and experimental waveform. (a) VCSEL with TO package;  
(b) VCSEL with bare chip

$$\eta_c(I) = \frac{\int P_{out}(I) dt}{\int V(I) \cdot I dt} = \frac{E_{out}}{\int VI dt}, \quad (12)$$

式中： $E_{out}$ 为能量计所测单个光脉冲所包含的能量。

如图 13 所示,在相同峰值电流情况下,TO 封装 VCSEL 的峰值功率相比裸芯片 VCSEL 平均低 5 W 左右,原因是 TO 封装的 VCSEL 引入的寄生电阻消耗了部分能量。电流电压存在相位差,二者相乘所得的瞬时功率中无有功分量,使得在相同电流情况下,TO 封装 VCSEL 的功率转换效率比裸芯片 VCSEL 低,如图 14 所示。

## 5 分析与讨论

TO 封装是常用的封装方式,在直流及准直流等电流变化较慢的工作条件下使用较为广泛。通过分析可知,普通 TO 封装器件在电流变化迅速的电路中的性能受限,因此在窄脉冲大电流的工作系统中,应注意减小封装引入的杂散参数。根据图 3 所示的 TO 封装结构,可知杂散参数主要是由金线、基板及引脚引入的,可通过优化达到减小杂散参数的

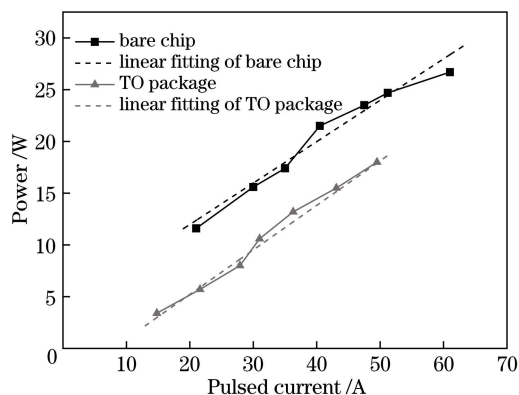


图 13 TO 封装 VCSEL 与裸芯片 VCSEL 的光脉冲峰值功率与峰值电流关系( $C=10$  nF,  $V=30\sim 90$  V)

Fig. 13 Relationship between peak power of optical pulse and peak current of VCSEL with TO package and VCSEL with bare chip ( $C=10$  nF,  $V=30\sim 90$  V)

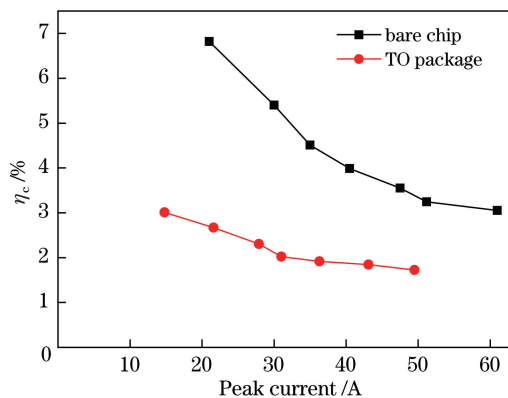


图 14 TO 封装 VCSEL 与裸芯片 VCSEL 的功率转换效率与峰值电流的关系( $C=10$  nF,  $V=30\sim 90$  V)

Fig. 14 Relationship between power conversion efficiency and peak current of VCSEL with TO package and VCSEL with bare chip ( $C=10$  nF,  $V=30\sim 90$  V)

目的。

1) 对 TO 封装的改进。在不影响封装效果的前提下,保证电流回路尽量短,如用于键合的金线和器件的引脚尽量短;其次,尽可能使用多条金线进行键合,通过并联减小杂散参数。

2) 将放电回路部分集成一体,封装于一个管座中。由于在窄脉宽条件下工作,电容取值小,小型陶瓷电容即可满足器件选型。同时,新型 GaN 开关材料耐压高,其封装体积远小于传统硅基 MOSFET,因此可以将激光芯片裸片、开关器件(或不带封装的开关芯片)、电容集成一体并封装于一个管座中。此时,整个管座大小接近原 TO 封装 VCSEL 管座大小,放电回路中各器件间距更小,减少了不必要的杂

散参数。

3) 采用倒装结构的 VCSEL 进行密封封装, 并将其倒装焊接在 PCB 电路板上。改变 VCSEL 结构, 使出光面电极与底部电极连接到同一个底座, 在底座制作凸焊点代替金线键合提供电气连接, 使 VCSEL 可以直接焊在 PCB 焊盘上。这种改进方式无需金线和引脚, 很大程度上减小了器件的杂散参数。

## 6 结 论

通过对比 TO 封装 VCSEL 和裸芯片 VCSEL 在窄脉冲大电流条件下的发光特性, 研究了封装引入的杂散参数对 VCSEL 脉冲发光特性的影响。结合仿真及实验结果得出: TO 封装 VCSEL 相比裸芯片 VCSEL 会引入更大的杂散参数, 包括杂散电感、杂散电阻等, 其中杂散电感占主要部分; 杂散参数会使放电脉冲电流幅值更低, 脉宽更长, 导致输出光脉冲的峰值功率较低, 脉宽较长, 同时由于杂散电感的存在, 电流与电压之间存在相位差, 降低了 VCSEL 光源的功率转换效率。在一些需要快上升沿、窄脉宽、大功率激光的应用场景中, 比如 LiDAR, 需要注意回路中杂散参数的控制, 通过改进激光光源的封装, 减少杂散参数的引入, 可提高系统的功率转换效率。

### 参 考 文 献

- [1] Zhou D L, Seurin J F, Xu G Y, et al. Progress on high-power high-brightness VCSELs and applications [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9381: 93810B
- [2] Carson R F, Warren M E, Dacha P, et al. Progress in high-power high-speed VCSEL arrays[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9766: 97660B.
- [3] Liang X M, Zhang X, Zhang J W, et al. 910 nm high peak power vertical-cavity surface-emitting laser source[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2019, 38(5): 668-673.  
梁雪梅, 张星, 张建伟, 等. 910 nm 高功率垂直腔面发射激光光源[J]. 红外与毫米波学报, 2019, 38(5): 668-673.
- [4] Gao S J, Zhang X, Zhang J W, et al. Miniaturized VCSEL pulsed laser source with high peak power at 980 nm[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2016, 35(5): 578-583.  
高世杰, 张星, 张建伟, 等. 980 nm 高功率微型化 VCSEL 脉冲激光光源[J]. 红外与毫米波学报, 2016, 35(5): 578-583.
- [5] Luo J W, Liu K, Wei Q, et al. Integrated chip for simultaneous transmission and reception in optical communication links[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(8): 0806003.  
罗俊伟, 刘凯, 位祺, 等. 光通信链路中集成芯片的收发一体工作[J]. 光学学报, 2019, 39(8): 0806003.
- [6] Li Z F, Wang H J, Wang W R, et al. Upconversion by vertical cavity surface emitting laser injection locking[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0206001.  
李知峰, 王红杰, 王文睿, 等. 利用垂直腔表面发射激光器注入锁定实现上变频[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0206001.
- [7] Seurin J F, Zhou D L, Xu G Y, et al. High-efficiency VCSEL arrays for illumination and sensing in consumer applications[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9766: 97660D.
- [8] Warren M E, Carson R F, Joseph J R, et al. High-speed and scalable high-power VCSEL arrays and their applications[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9381: 93810C.
- [9] Zhang J W, Ning Y Q, Zhang X, et al. 910 nm vertical-cavity surface-emitting laser arrays with 100 W output power level and low driving current [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2018, 57(10): 100302.
- [10] 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): 1-15.
- [11] Glaser J S. eGaN FETs for lidar: getting the most out of the EPC9126 laser driver [EB/OL]. [2019-11-11]. <https://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/application-notes/an027%20getting-the-most-out-of-egan-fets.pdf>.
- [12] Texas Instruments. Nanosecond laser driver reference design for LiDAR[EB/OL]. (2018-02-26) [2019-11-11]. <http://www.ti.com/tool/TIDA-01573>.
- [13] Reusch D, Strydom J. Understanding the effect of PCB layout on circuit performance in a high-frequency gallium-nitride-based point of load converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(4): 2008-2015.
- [14] Wens M, Redoute J M, Blanchaert T, et al. An integrated 10 A, 2.2 ns rise-time laser-diode driver for LIDAR applications[C]//2009 Proceedings of ESSCIRC, September 14-18, 2009, Athens, Greece. New York: IEEE, 2009: 145-148.
- [15] Directed Energy, Inc. PCO-7110 laser diode driver module [EB/OL]. [2019-11-11]. [https://directedenergy.com/wp-content/uploads/2017/09/PCO-7110\\_Manual\\_RevA.pdf](https://directedenergy.com/wp-content/uploads/2017/09/PCO-7110_Manual_RevA.pdf).

- [16] Seurin J F, Ghosh C L, Khalfin V, et al. High-power high-efficiency 2D VCSEL arrays[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6908: 690808.
- [17] Hallman L, Huikari J, Kostamovaara J. A high-speed/power laser transmitter for single photon imaging applications [C] // SENSORS, 2014 IEEE, November 2-5, 2014, Valencia, Spain. New York: IEEE, 2014: 1157-1160.
- [18] Wen S C, Wang M, Xie J, et al. Large current nanosecond pulse generating circuit for driving semiconductor laser diode[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2019, 61(4):867-872.
- [19] Ou Y, Gustavsson J S, Westbergh P, et al. Impedance characteristics and parasitic speed limitations of high-speed 850-nm VCSELs[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(24): 1840-1842.
- [20] Ouyang L. Equivalent circuit model of vertical cavity surface emitting lasers [D]. Shanghai: East China Normal University, 2011.  
欧阳丽. 垂直腔体表面发射激光器等效电路模型的研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2011.
- [21] Bour D P, Rosen A. Optimum cavity length for high conversion efficiency quantum well diode lasers [J]. Journal of Applied Physics, 1989, 66(7): 2813-2818.