

采用 GaN HEMT 的可调窄脉冲激光器驱动电路

杨仕轩^{1,2}, 赵柏秦^{1*}, 王立晶³, 王 宁^{1,2}

- (1. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要: 为实现纳秒级的输出光脉宽, 使用 GaN HEMT 作为激光器放电回路的开关管。由于 GaN HMET 的栅极总电荷小, 提出使用小尺寸的 GaN HEMT 建立驱动电路的输入级, 响应控制信号, 控制放电回路开关管。搭建电路驱动 860 nm 激光器, 并进行测试。放电回路电源电压为 12 V, 测试结果显示, 最大输出光脉宽 8.8 ns 对应大于 8 W 的峰值功率, 输出最小光脉宽为 4 ns。为实现更大的脉宽可调范围, 设计另一款电路并测试。该电路实现输出光脉宽大于 8.4 ns 可调, 在电源电压 20 V、输入信号脉宽 100 ns 的条件下, 输出光峰值功率可达 46 W。电路尺寸分别为 10 mm×6 mm 和 13 mm×11 mm, 为实现进一步小型化, 对设计的电路提出了集成方法。提出的电路结构简单、容易实现集成且成本低, 为窄脉冲激光器驱动电路的设计提供了新的思路。

关键词: 半导体激光器; 驱动电路; GaN HEMT; 窄脉冲; 小型化

中图分类号: TN248.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220036

Adjustable narrow pulse laser drive circuit using GaN HEMT

Yang Shixuan^{1,2}, Zhao Baiqin^{1*}, Wang Lijing³, Wang Ning^{1,2}

- (1. Institute of Semiconductor, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. School of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: GaN HEMT is used as the switch of the discharge circuit to achieve nanosecond pulse width. Due to the low total gate charge of GaN HMET, a GaN HEMT with small size is used to build the input stage of the driver circuit to respond to the control signal and control the discharge circuit switch. The circuit is built to drive the 860 nm laser and tested. The power supply voltage of the discharge circuit is 12 V, and the test results show that the maximum output pulse width of 8.8 ns corresponds to a peak power greater than 8 W, and the minimum output pulse width is 4 ns. Another circuit is designed and tested to achieve a larger pulse width adjustable range. The circuit realizes adjustable pulse width greater than 8.4 ns of output light. When the power supply voltage is 20 V and the pulse width of the input signal is 100 ns, the output optical peak power can reach 44 W. The area of the circuit is 10 mm×6 mm and 13 mm×11 mm. In order to realize further miniaturization of the drive circuit, an integration method is proposed for the two designed circuits. The proposed circuit is simple in structure, easy to

收稿日期:2022-01-11; 修订日期:2022-01-29

作者简介:杨仕轩,男,硕士,主要从事激光器驱动电路及氮化镓高电子迁移率晶体管方面的研究。

通讯作者:赵柏秦,男,研究员,博士生导师,博士,主要从事微波声学、无源光波导器件、脉冲半导体激光器、硅光电池、砷化镓霍尔器件、物联网新型传感器件及应用模块、红外激光引信系统等方面的研究。

realize integration and low in cost, which provides a new idea for the design of narrow pulse laser drive circuit.

Key words: semiconductor laser; driver circuit; GaN HEMT; narrow pulse; miniaturization

0 引言

激光探测技术广泛应用于多个领域,具有方向性强、定距精度高、抗电磁干扰能力强等优点^[1-3]。激光发射模块是激光探测系统的重要组成部分,探测系统通过其发射激光经目标反射后回到接收模块进行探测。应用领域的不断拓宽使得窄脉冲、小型化成为发展趋势,实现可调窄脉宽输出的小型激光器驱动电路对激光探测系统的发展具有重要意义。

激光器驱动电路通常由栅极驱动电路、功率 MOSFET、储能电容等组成,栅极驱动电路与功率管的集成是小型化的主要发展方向。Ji Yafei 等^[4]利用 0.25 μm BCD 工艺设计双路激光器驱动 IC 将组成栅极驱动电路的芯片集成,实现脉宽 50~500 ns 可调。Han Wei 等^[5]在氮化铝基板上组装了激光器管芯与激光器驱动电路,在压缩尺寸的同时降低了寄生效应。Wang Lijing 等^[6]采用 3D 封装的形式将栅极驱动 IC 和功率 MOSFET 管芯集成,极大地减小了驱动电路的尺寸。但是以上方案都未能良好地实现小尺寸与窄脉宽两个方面的结合。

氮化镓 (GaN) 材料与硅材料相比,具有更高的禁带宽度、电子饱和速度、临界击穿电场等^[7]。因此,相同小面积下的 GaN HEMT 比 Si 的功率 MOSFET 有更高的击穿电压和更低的导通电阻,并且, GaN HEMT 具有更高的工作频率。Armin Liero 等^[8]利用 GaN HEMT 作为激光器放电回路开关管,实现皮秒级的输出光脉冲,放电电流超过 30 A。但电路存在三种工艺的器件,难以实现单片集成。上述优势及实例表明, GaN HEMT 替代 Si 的功率 MOSFET 可以同时兼顾激光器驱动电路的小尺寸与窄脉冲宽度两个要求。除此之外,小尺寸 GaN HEMT 具有非常小的栅极总电荷,同时拥有不低的过流能力,为其构建驱动电路的输入级创造可能性。

首先介绍 GaN HEMT 的器件结构及栅极总电荷,并对器件结构进行简单仿真及分析,验证其能够直接被信号源驱动。然后提出共漏极结构作输入级的驱动电路,并进行仿真、测试及分析。在共漏极驱动电路的基础上,提出输出脉宽可调范围更大、峰值

功率更高的共源极结构作输入级的驱动电路,并进行测试及分析。最后,基于全 GaN 集成工艺与 3D 堆叠式封装,提出电路的集成方法,并进行可行性分析,该方法可以进一步减小电路尺寸,降低寄生效应。

1 GaN HEMT 器件结构及仿真

1.1 GaN HEMT 器件结构

直接生长的 GaN HEMT 为耗尽型器件,需引入增强型技术。其中, P 型栅和 Cascode 结构工艺比较成熟,但 P 型栅结构的器件尺寸更小,因此,研究围绕 P 型栅器件展开,图 1 展示了其器件结构剖面图。

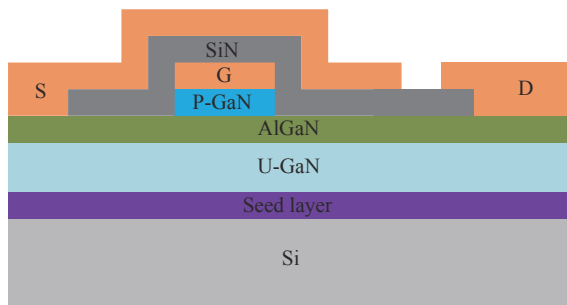


图 1 器件结构剖面图

Fig.1 Cross-section view of device structure

当前的 GaN 电子电力器件大多采用硅衬底,碳化硅衬底的器件电学性能更优,但其成本高,多用于射频器件的制造。衬底上的种子层有益于 GaN 材料的异质生长。U-GaN(Unintentional Doping GaN)层之上是与之形成二维电子气的 AlGaN 势垒层, P-GaN 通过与势垒层形成耗尽区从而消除栅极下方沟道,达到关断的状态。栅金属之上是 Si₃N₄ 钝化层,钝化层可以抑制势垒层表面态对沟道的影响,抑制电流崩塌效应^[9]。源极场板 (Source Field Plate) 将栅极靠漏极一侧的电场向场板边沿推移,从而达到提高击穿电压的目的^[10];漏极场板 (Drain Field Plate) 与源极场板的作用相似,但会增加 miller 电容^[11],增大开关损耗。

1.2 栅极总电荷与器件结构仿真

晶体管开启过程中,栅极电流首先对栅源电容充电,当器件进入 miller 平台,栅源电压保持不变,栅极电流为栅漏电容充电,最终使得栅漏电压由负转正。

当漏源电压降至最低,器件跳出 miller 平台。为方便栅极总电荷的仿真结果计算,将一定输入电压下的栅极总电荷分为 3 个部分:栅源电容上的正电荷、栅漏电容上的正电荷、栅漏电压由负转正过程中消耗的正电荷。

特殊的器件结构使 GaN HEMT 具有很小的栅极总电荷,为小尺寸 GaN HEMT 搭建输入级电路创造了条件。根据图 1 构建 $6.5 \mu\text{m} \times 1000 \mu\text{m}$ 的原胞,对器件结构进行简单仿真。图 2 为输出特性曲线的仿真结果,栅极电压 5 V 时对应的最大电流密度为 0.39 A/mm 。以后续使用实际器件的脉冲峰值电流 18 A 为标准,取 50 个原胞并联,栅极电压上升至 5 V 时,对应 320 pC 的栅极总电荷。若信号源仅有 20 mA 的平均输出电流,利用 $Q=It$ 粗略计算栅极电压上升至 5 V 所需的时间为 16 ns ,可以实现快速开关。实际的栅极总电荷还与器件的工艺、封装等有关,会高于仿真值。但仿真设置的电子迁移率较低,当前良好衬底的电子迁移率较高;且为保证较高的漏源击穿电压,设置的栅漏距离较大。因此,该尺寸的实际制造器件的过流能力可能比仿真结果强。仿真和粗略计算的结果表明,采用小尺寸 GaN HEMT 有望实现输入级的搭建。

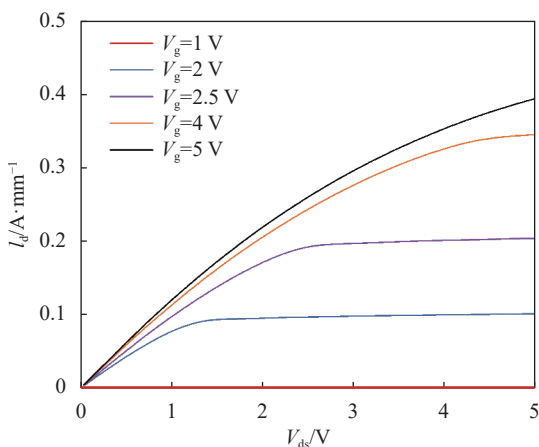


图 2 输出特性曲线

Fig.2 Output characteristic curve

2 驱动电路设计

2.1 电路结构仿真及分析

采用 EPC (宜普电源转换公司) 的两款 GaN

HEMT 组成驱动电路,阈值电压皆为 1.4 V 。首先使用小尺寸的 GaN HEMT 搭建输入级,采用共漏极形式,如图 3(a) 所示。采用电容值与大尺寸 GaN HEMT 的输入电容相近的电容 C_L ,与电阻 R_L 并联作为共漏极输出负载,红色虚线框内为 PCB 上的电路。在实测系统中,信号源及电源与驱动电路之间的连接导线有较大寄生参数,根据其长度及 PCB 的布线估算电路中的寄生电感 $L_{1,3}$, R_{in} 为信号源内阻, $R_{1,3}$ 为寄生电阻, R_g 为 M_1 的栅极电阻,此外,还存在分布电容。

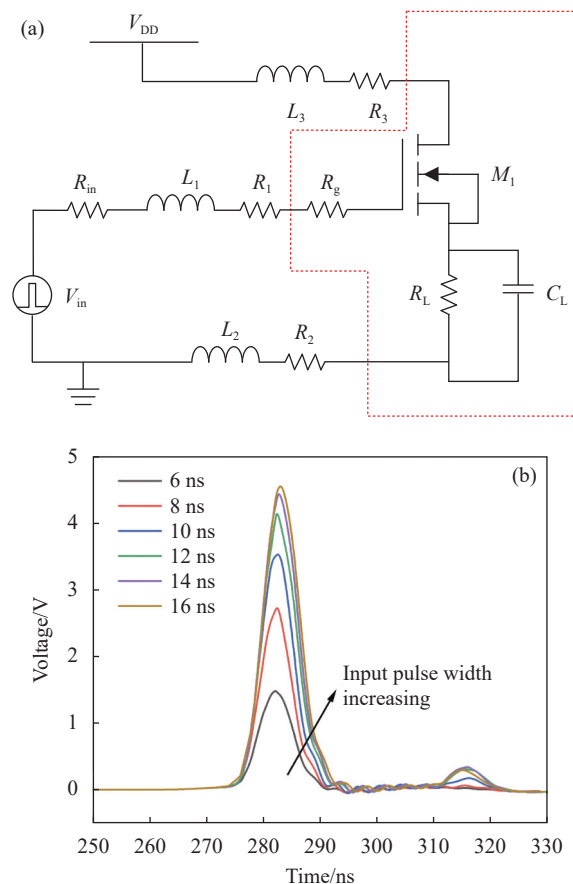


图 3 电路结构及仿真。(a) 共漏极电路;(b) 源极电压仿真结果

Fig.3 Circuit structure and simulation. (a) Common drain circuit; (b) Source voltage simulation results

使用 PSpice for TI 对电路进行仿真,设置 V_{DD} 为 5 V , V_{in} 频率为 10 kHz 、电平为 5 V 、上升沿下降沿为 3 ns 的脉冲信号,脉宽为 $6 \sim 16 \text{ ns}$,步长 2 ns , M_1 源极电压仿真结果如图 3(b) 所示。源极电压波形形状基本不变,幅值由 1.48 V 增加至 4.55 V ,脉宽由 5.9 ns 增加至 6.1 ns 。若继续增加输入信号的脉宽,源极电压峰值不变,脉宽会略微展宽。仿真结果表明:该器

件可以构建输入级电路, 响应信号源输出, 控制激光器放电回路的充放电。

2.2 测试及分析

使用美国宜普电源转换公司的两款 GaN 器件 EPC2036 与 EPC2045, 于 PCB 上搭建前文所述电路, 加入激光器放电回路, 驱动 860 nm 半导体激光器^[6], 如图 4 所示。选择的厂家仅生产大于 10 mm×10 mm 的 PCB, 电路实际有效尺寸为 10 mm×6 mm。

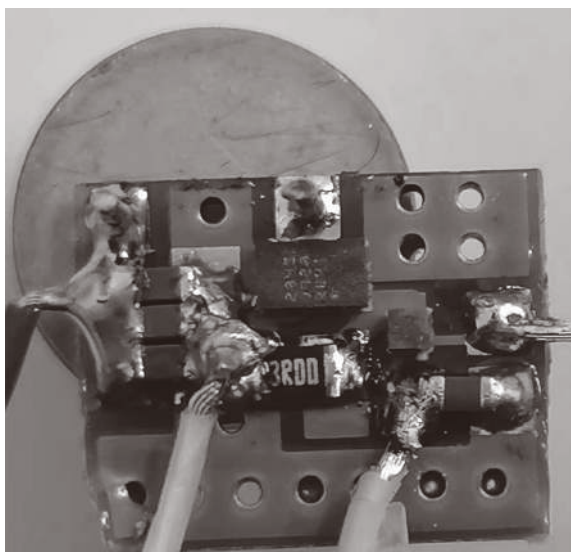


图 4 板级驱动电路

Fig.4 Driver circuit on PCB

测试条件与仿真一致, 但输入脉宽范围不同, 为 8~18 ns, 由普源精电的信号发生器 DG5102 设置输出, 激光器放电回路电压为 12 V。测试系统如图 5 所示, 采用连接示波器的光电探测器接收输出光信号, 获得激光器输出光脉冲波形, 如图 6(a)~(f) 所示, 将波形导出为 CSV 格式文件, 并使用绘图软件绘制, 如图 6(g) 所示。通过观察示波器得到输出光脉冲脉宽, 为 4~8.8 ns。输入脉宽分别为 16 ns 和 18 ns, 对应的

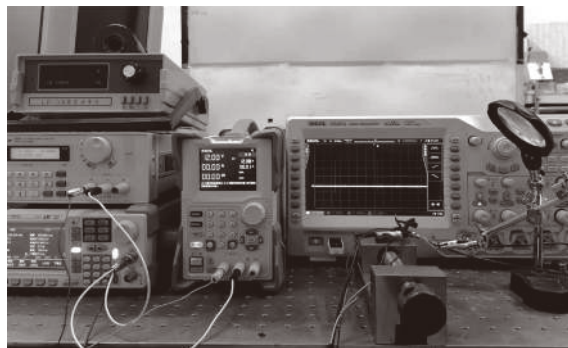


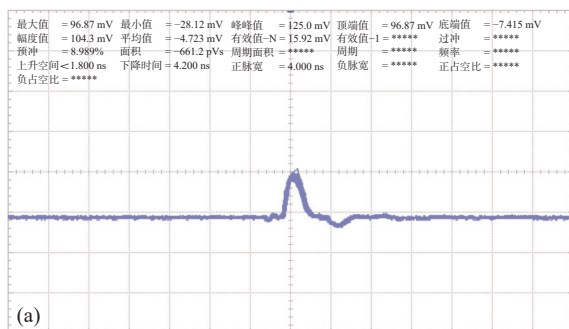
图 5 测试系统

Fig.5 Test system

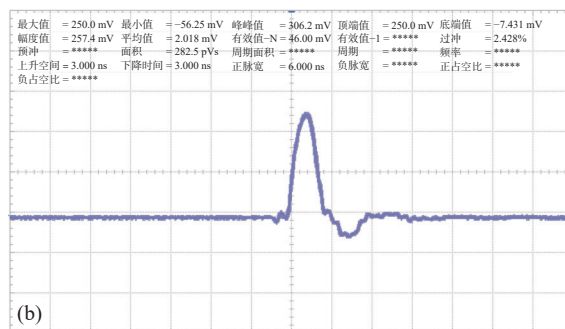
输出光脉冲曲线几乎重叠, 因此, 可以调整输出光脉冲的有效输入信号脉宽范围为 8~16 ns。使用 LP-3B 激光功率计测量输出平均光功率, 采用平均光功率与占空比相除的方式计算峰值功率, 为 3.7~8.3 W。

仿真结果与测试结果相近, 输出信号形状近似不变、幅值变化, 超出有效输入脉宽 8~6 ns 时增加输入脉宽, 输出光脉冲的脉宽与幅值基本不变, 超过一定值会出现多脉冲, 文中仅使用第一个脉冲。放电回路的开关管存在开关时间, 输出光脉冲相对于开关管栅极电压有一定的滞后, 体现为输入信号脉宽可调范围的整体后移。测试结果中的输入级输出电压脉宽范围大于仿真结果中的范围, 分别为 5~7 ns、5.9~6.1 ns。原因可能是获取方式不同, 前者是由示波器示数读出, 而后者是由绘图软件得出。

M_1 使用的器件为 100 V 增强型 GaN HEMT, 其源漏击穿电压与源漏距离相关, 而 M_1 并不需要高的击穿电压。在电路的单片集成过程中, 可以将 M_1 的源漏距离缩小, 不仅可以降低导通电阻, 也可以减小并联的原胞个数, 从而减小栅极总电荷, 增加器件的响应速度。测试使用封装之后的激光器, 回路中最大的寄生电感存在于激光器与电路的连接。若直接使



(a)



(b)

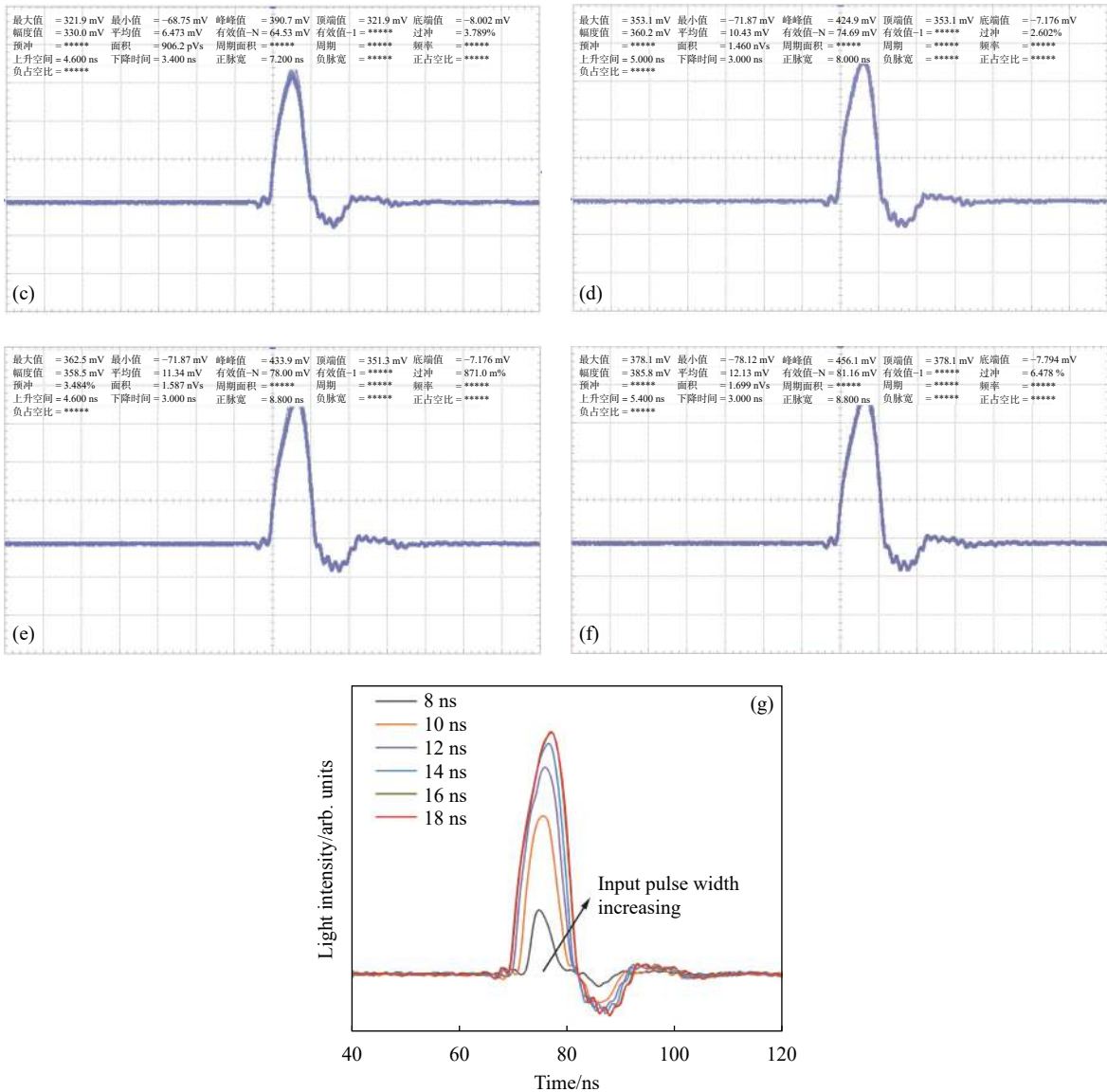


图 6 输出光波形。(a)-(f) 示波器显示波形; (g) 导出数据绘制波形

Fig.6 Output optical waveforms. (a)-(f) Waveforms displayed by an oscilloscope; (g) Waveforms drawn from the derived data

用激光器管芯,可以降低寄生效应,增加输出光功率,笔者所在课题组已进行相关研究^[5,12]。

3 更大脉宽可调范围电路与集成

3.1 电路结构测试及分析

对于第 2 节提出的电路,其输出脉宽可调范围有限,需要新的电路结构,实现更大的输出脉宽可调范围。仍使用 GaN HEMT 搭建输入级,采用共源极结构。共源极结构将输入信号反相,需要添加一级再一次反相。从单片集成的角度考虑,P 沟道 GaN 器件无疑是最好的选择,但 P 型 GaN 的空穴迁移率低,不利

于制备 P 沟道功率器件。另一种办法是使用耗尽型和增强型的 N 沟道 GaN 器件构成反相器,但存在长时间导通的支路,受到散热与功耗的限制。最终选取 Si PMOS 与电阻构成中间级,如图 7 所示。最终的 PCB 尺寸为 13 mm×11 mm。

除输入信号脉宽外,其他测试条件与前文一致。输入脉宽为 10~100 ns,步长为 30 ns,将示波器测试结果导出并绘制波形,如图 8 所示。最窄输出光脉宽由示波器示数读出,为 8.4 ns,此时输出光脉冲峰值功率为 8.3 W,脉宽可调至 100 ns 以上。电源电压升至 20 V,输入脉宽 100 ns 时,输出光峰值功率可达 46.6 W。

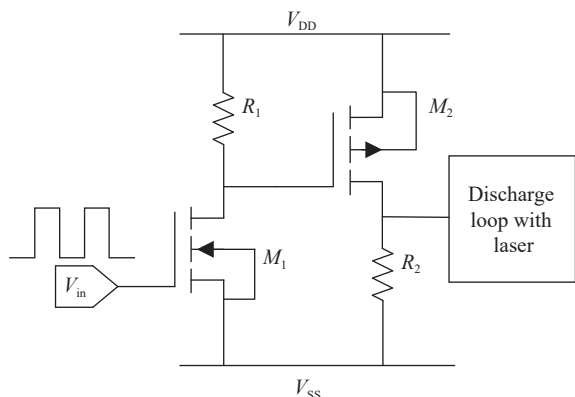


图 7 输出光脉宽拓展电路

Fig.7 Circuit widening output light pulse width

测试结果表明,电路实现了更大的输出光脉宽可调范围。选取的 M_2 响应速度较慢,在栅极电压较低时导通电阻较大,导致输出光脉冲上升沿的时间较长。可以选用响应速度更快、导通电阻更低的 PMOS,使上升沿更加陡峭。

表 1 展示了文中提出电路与相关参考文献所提出电路的比较。脉冲宽度为输出光脉宽范围,峰值功

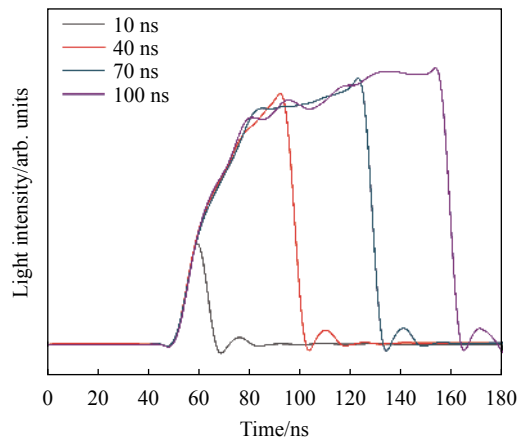


图 8 输出光波形

Fig.8 Output optical waveforms

率为输入脉宽 100 ns 时的输出光脉冲峰值功率,且参考文献 [4] 与 [6] 中激光器放电回路电压大于文中使用的 20 V。测试采用 GaN HEMT 的尺寸分别为 2.5 mm×1.5 mm、0.9 mm×0.9 mm, Si PMOS 尺寸为 2.8 mm×1.2 mm,若采用 3.2 节中的集成方法,集成的预期尺寸小于 (2.5+0.9) mm×(1.5+0.9) mm。

表 1 对照表

Tab.1 Comparison table

	Ref. [4]	Ref. [6]	Circuit 2 of this work
Topology	CMOS gate driver + Si switch	CMOS gate driver + Si switch	GaN HEMT + Si PMOS + GaN switch
Gate driver IC	Yes	Yes	No
Pulse width/ns	50-500	>160	>8.4
Peak power/W	30	18	>46
Die size/mm ²	5×5	5×5	<3.4×2.4(Expected integration area)
Total size/mm ²	N/A	N/A	13×11

3.2 集成方法

GaN 器件的优点使得全 GaN 电路单片集成受到国内外广泛的研究。高校与企业陆续开发了基于不同增强型技术的集成工艺平台。其中,台积电提出了基于 P-GaN 增强型技术的 100 V/650 V GaN-on-Si 的工艺平台^[13],可以集成电阻、二极管、低压逻辑晶体管、高压功率晶体管等元件。Chen 等^[14]提出了一款基于 GaN 工艺的电路,集成了驱动器及 650 V 增强型 GaN HEMT。

第 2 节中提出的驱动电路,其所使用的电子元件除储能电容外,只有少数的晶体管和电阻,基于

GaN 工艺,容易实现单片集成,图 9 为其集成工艺结构示意图。

目前大多 GaN 外延片具有 AlGaN 势垒层,可以直接制备 GaN HEMT,电阻与 GaN HEMT 制备工艺兼容,不需额外的工艺步骤。因此,整个驱动电路采用 GaN HEMT 的制备工艺即可完成单片集成。

第 3.1 节提出的电路比第 2 节提出的电路多出 Si PMOS 和电阻,采用 Si PMOS 工艺制备,电路中除电容外的其余元件采用 GaN HEMT 工艺制备,将两部分集成,即可完成电路的集成。集成方式采用 3D 堆叠式封装,将面积小的管芯倒扣在另一管芯上,笔者

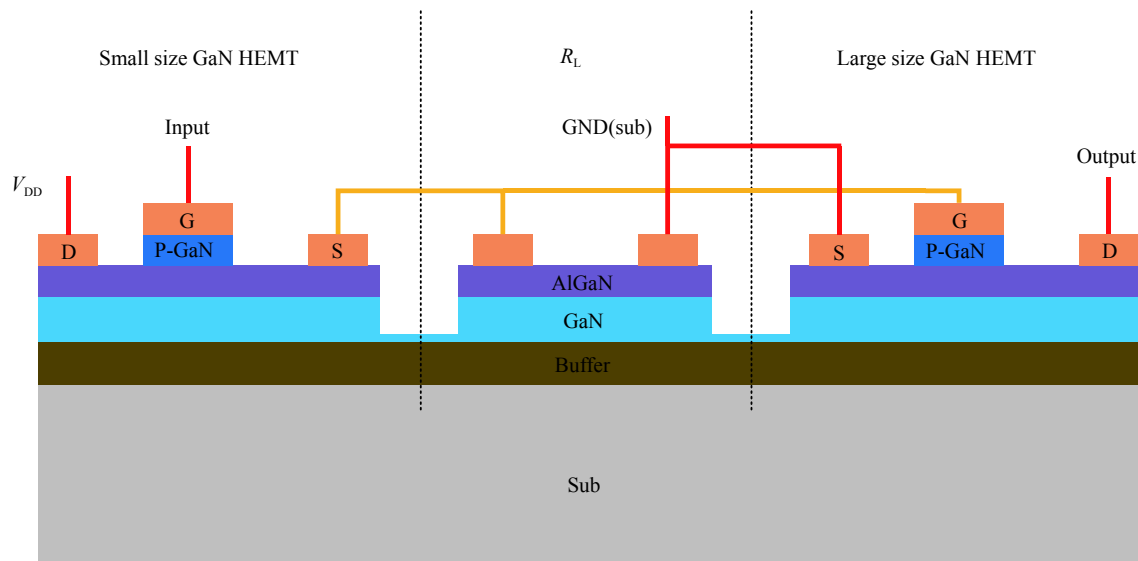


图 9 集成工艺结构示意图

Fig.9 Schematic diagram of integrated process structure

所在课题组已进行相关研究^[6]。

4 结 论

针对半导体激光器驱动电路的可调窄脉宽、小型化的需求,基于 GaN HEMT 栅极总电荷小、导通电阻低等优点,提出激光器放电回路开关管采用 GaN HEMT,并使用其构建输入级,完成栅极驱动器的功率放大功能。通过器件结构仿真与 PCB 电路测试,证实小尺寸 GaN HEMT 能够快速响应信号发生器输出的脉冲信号,并为后级开关管提供足够的栅极电流。该电路具有 10 mm×6 mm 的超小面积,可以驱动激光器输出脉宽为 4~8.8 ns 的光脉冲,实现了纳秒级窄脉宽。

为实现更大的输出光脉宽可调范围,提出另一款驱动电路,电路尺寸为 13 mm×11 mm,实现了激光器驱动电路的小型化,打破了栅极驱动器控制激光器放电回路的模式。测试结果表明,该电路的输出光脉宽为大于 8.4 ns 可调,满足可调窄脉宽的需求。为实现进一步小型化,提出了电路的集成方法。提出的驱动电路结构简单、占用面积小、制作成本低,与提出的集成方法共同为小型的窄脉冲激光器驱动电路设计提供了新的方向。

参考文献:

[1] Wei Y, Jiang S L, Sun G B, et al. Design of solid-state array

laser radar receiving optical system [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(3): 517-526. (in Chinese)

[2] Gao W K, Du X P, Wang Y, et al. Review of laser speckle target detection technology [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(6): 1182-1193. (in Chinese)

[3] Wei C J, Yan R P, Li X D, et al. Research progress of sub-nanosecond lasers for 3D imaging lidar [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(6): 1270-1280. (in Chinese)

[4] Ji Y F, Zhao B Q, Luo D X. Design of an ASIC for the driving and receiving part of dual-wavelength laser fuze [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0705004. (in Chinese)

[5] Han W, Zheng X, Zhao B Q. Design of miniaturized transmitting-receiving system for laser detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 0906008. (in Chinese)

[6] Wang L J, Zhao B Q, Yang S X. Design of high current narrow pulse laser driving chip [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(11): 20210034. (in Chinese)

[7] Khadar R A, Liu C, Soleimanzadeh R, et al. Fully vertical gan-on-si power MOSFETs [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2019, 40(3): 443-446.

[8] Liero A, Klehr A, Hoffmann T, et al. GaN laser driver switching 30 a in the sub-nanosecond range[C]//European Microwave Conference. IEEE, 2016.

[9] Zhong Y, Su S, Chen X, et al. Normally-off HEMTs with regrown p-gan gate and low-pressure chemical vapor deposition SiN [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2019, 40(9): 1495-1498.

- [10] Godfrey D, Nirmal D, Arivazhagan L, et al. Investigation of AlGaIn/GaN HEMT breakdown analysis with source field plate length for high power applications[C]//2020 5th International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS), 2020.
- [11] Soni A, Singh A, Shrivastava M. Novel drain-connected field plate GaN HEMT designs for improved V_{BD} - R_{on} tradeoff and RF PA performance [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2020, 67(4): 1718-1725.
- [12] Chen Y C, Zhao B Q, Li W. High peak power semiconductor laser module for producing nanoseconds pulse [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(4): 695-700. (in Chinese)
- [13] Lai J Y, Chen W J, Sun R Z, et al. Development of GaN monolithic power integrated circuits [J]. *Electronics and Packaging*, 2021, 21(2): 020103. (in Chinese)
- [14] Chen H Y, Kao Y Y, Zhang Z Q, et al. 33.1 A fully integrated GaN-on-Silicon Gate Driver and GaN Switch with temperature-compensated fast turn-on technique for improving reliability[C]//2021 IEEE International Solid- State Circuits Conference (ISSCC). IEEE, 2021.