



·脉冲功率技术·

## 基于光导半导体的 MHz 高重频可调 谐脉冲产生技术研究\*

楚 旭, 王朗宁, 朱效庆, 王日品, 王 彬, 荀 涛, 刘金亮

(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 长沙 410073)

**摘 要:** 随着微波光子学的发展, 新型光导微波技术利用高重频脉冲簇激光, 入射到线性光导半导体器件中产生可调谐高功率电磁脉冲的方式受到广泛关注。SiC 光导半导体开关(PCSS)具有高击穿场强, 高饱和载流子速率, 高抗辐射能力, 高热传导率和高温工作稳定性等优点, 是产生高重频、高功率、超短脉冲的重要固态电子器件。介绍了一种基于钒补偿半绝缘 4H-SiC PCSS 的 MHz 重复频率亚纳秒脉冲发生器。该发生器采用 1 MHz, 1030 nm 可调谐光脉冲宽度的激光簇驱动源, 4H-SiC PCSS 的厚度为 0.8 mm。整系统可得到最大输出电功率 176 kW、最小半高宽约为 365 ps 的 MHz 重频短脉冲。

**关键词:** 光导半导体开关; 重复频率; 可调谐亚纳秒脉冲; 脉冲发生器

中图分类号: TN78

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210569

## Research on tunable pulse generation with MHz repetition rate based on compensated 4H-SiC photoconductive semiconductor

Chu Xu, Wang Langning, Zhu Xiaoqing, Wang Ripin, Wang Bin, Xun Tao, Liu Jinliang

(College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Agile high repetition rate discharge technology has important applications in improving plasma uniformity. SiC photoconductive semiconductor switch (PCSS) has the advantages of high breakdown field strength, high saturated carrier rate, high radiation resistance, high thermal conductivity and high temperature stability. It is an important solid-state electronic device to produce high repetition rate, high power and short width pulse. Operation characteristics of the MHz repetition frequency sub-nanosecond pulse generator based on vanadium-compensated semi-insulating (VCSI) 4H-SiC PCSS under high electric field are presented in this paper. 1 MHz, 1030 nm laser cluster driver with tunable optical pulse width is used for VCSI 4H-SiC PCSS response test. The 0.8 mm thick 4H-SiC PCSS can work with electric fields up to 200 kV/cm and the electrical power capacity up to 176 kW without failure for long time. The minimum photocurrent pulse width is about 365 ps and the jitter is less than 100 ps.

**Key words:** photoconductive semiconductor switch, repetition frequency, agile sub-nanosecond pulse, pulse generator

高重频亚纳秒短脉冲发生技术在生物肿瘤治疗、超声波脉冲应用、激光驱动器和超宽带辐射源等方面有着广泛的应用<sup>[1-8]</sup>。基于固态快速开关器件产生时域冲击短脉冲, 是实现高重频电磁脉冲的一种主要形式, 而亚纳秒短脉冲发生则要求固态开关具有几十 ps 到几百 ps 的导通或关断时间。根据核心器件的不同, 可以分为功率电子器件和光导开关器件。近年来, 随着半导体技术和激光技术的发展, 利用固态光导器件产生高重频电磁脉冲获得了广泛关注<sup>[9-14]</sup>。但目前研究多集中于利用光导器件的快速导通特性直接产生宽谱或超宽谱电磁脉冲(开关振荡器), 输出频谱参数通常固定或难以大范围调谐。4H-SiC 是一种具有高临界电场强度、高电子饱和速度、高热导

\* 收稿日期: 2021-12-21; 修订日期: 2022-05-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(62071477, 62101577); 湖南省自然科学基金项目(2021JJ40660)

联系方式: 楚 旭, 15580957460@163.com。

通信作者: 荀 涛, xtao\_0301@hotmail.com;

刘金亮, lile333@163.com。

率和热稳定性的宽带隙半导体材料。4H-SiC 的载流子复合时间一般小于 100 ps, 可以实现亚纳秒快速导通关断。受杂质钒深主能级影响, 532 nm 与 1064 nm 等非本征波长光同样可以用来触发钒补偿半绝缘 4H-SiC 光导开关。2018 年, 国防科技大学利用厚度为 800  $\mu\text{m}$  的轴向透明电极结构光导半导体开关(PCSS), 在峰值光功率为 2 MW 的激光脉冲触发下, 实现了 10.65 MW 的最大电功率输出<sup>[14-15]</sup>。

在实际应用中, 4H-SiC 光导开关的主要问题在于光电转化效率较低, 需要较大的触发激光功率来降低 PCSS 的电阻, 一方面会导致激光触发系统体积结构过于复杂, 成本较为昂贵。另一方面, 高功率激光脉冲对于光导开关的损伤也较为严重, 从而降低了脉冲源系统工作寿命。因此, 提高器件的光电转换效率对于系统设计至关重要。目前, 关于高重复亚纳秒激光器技术已较为成熟。2021 年, 国防科技大学贺璇博士设计报道了一种高功率脉冲簇全光纤激光系统, 可以实现脉冲重频 0~10 GHz 连续可调, 峰值功率为 10 kW, 脉冲簇内占空比为 50%, 脉冲簇宽度为 100 ns<sup>[15]</sup>。此外, 在商用激光驱动源方面, 国内安扬激光、青岛自贸激光、合肥迈锐激光等商业激光器生产厂家已经推出成熟的高功率 MHz 重频亚纳秒可调谐激光器产品。本文设计了一种基于钒补偿半绝缘 4H-SiC 光导开关的 1 MHz, 16 kV 可调谐亚纳秒脉冲发生器, 可实现最大电功率 176 kW, 最小半高宽约为 365 ps, 抖动小于 100 ps 的高压短脉冲输出。

## 1 器件结构与实验设计

4H-SiC 材料具有宽禁带 (3.265 eV, 4 K)、高载流子饱和速率 ( $2 \times 10^7 \text{ cm/s}$ )、高耐压能力 (300~500 MV/m) 等优点。在钒补偿半绝缘 (VCSI) 的作用下, 4H-SiC 具有较高的暗电阻率 ( $\sim 10^{12} \Omega$ )。VCSI 4H-SiC 由浅施主—深主 (SDDA) 结构组成。硼 (B) 和铝 (Al) 是主要的深主掺杂剂, 其中硼浓度为  $3.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , 铝浓度为  $4.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。氮 (N) 是浅施主, 其浓度约为  $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。本文设计使用了厚度为 0.8 mm, 直径为 6 mm 的垂直电极 4H-SiC 光导开关器件。4H-SiC 衬底的尺寸为 12 mm $\times$ 12 mm。为了提高器件的光电转化效率, 一方面考虑到半导体材料在非本征波长光下的吸收系数很弱, 采用掺铝氧化锌 (AZO) 透明导电窗口作为正电极, 用以增大光透过率; 另一方面由银反射镜组成负电极, 使光在半导体内部形成多次反射, 从而提高光吸收效率。同时, 为了提高光导开关器件耐压能力, 设计了一种 VCSI 4H-SiC 光导半导体晶片的绝缘封装结构, 如图 1 所示, 主要由光导开关晶片, 两个圆柱形接触电极、两个电极固定板和绝缘封装盒组成。绝缘盒的中空部分填充有透明绝缘材料。该封装结构可以很好地解决 PCSS 器件与外接触电极之间的欧姆接触和高压绝缘电阻问题。

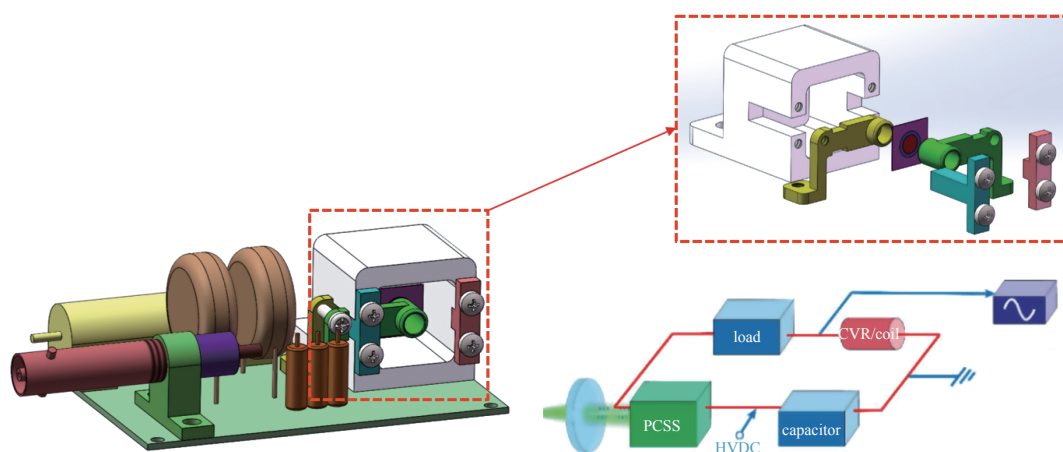


Fig. 1 Insulated package structure of VCSI 4H-SiC PCSS device and circuit diagram of CVR high frequency response circuit

图 1 4H-SiC 光导半导体器件封装结构与 CVR 高频响应电流图

基于钒补偿 4H-SiC PCSS 的 MHz 超高重复频率亚纳秒脉冲发生器的实验电路结构如图 1 所示。它主要由 MHz 高频激光驱动器、CVR 高频响应电路和光灵敏探测器组成。响应电路由一个 50 kV, 1 nF 陶瓷存储电容器和一个 100  $\Omega$  负载电阻器组件组成。在开关测试期间, 电容器的行为类似于直流电压源。负载电流由示流电阻 (CVR) 测量, 光脉冲由光波形检测器监测。CVR 是一个小电阻, 我们测量电阻两端的电压, 进而得到电流波形。CVR 电阻为 0.1  $\Omega$ , 带宽高达 2 GHz (T&M SSDN-10)。本实验所用的激光驱动源是一个重复频率为 1 MHz 的高频脉冲簇激光器, 它的最大平均输出功率约为 95 W。它具有 300 ps 和 1.5 ns 的可调激光脉冲宽度, 信号由带宽为 6 GHz 的示波器 (LeCroy WR9404M) 测量。

## 2 光导半导体器件模拟分析

由于寄生电参数的影响,光导器件等效电路如图 2 所示。在等效电路中,PCSS 可以看做是一个可变电阻器 ( $R_{PCSS}$ )和电容器( $C_p$ )构成的并联结构。电路的寄生电感( $L_p$ )与 PCSS 串联。PCSS 的等效阻抗可以在式(1)和(2)中得到

$$Z_{PCSS} = j\omega L_p + \frac{1}{\frac{1}{R_{PCSS}} + j\omega C_p} = \frac{R_{PCSS}}{1 + (\omega C_p R_{PCSS})^2} + j\left(\omega L_p - \frac{\omega C_p R_{PCSS}^2}{1 + (\omega C_p R_{PCSS})^2}\right) \quad (1)$$

$$|Z_{PCSS}| = \left[ \frac{R_{PCSS}^2 + \omega^2 C_p^2 R_{PCSS}^4 - 2\omega^2 L_p C_p R_{PCSS}^2}{(1 + \omega^2 C_p^2 R_{PCSS}^2)^2} + \omega^2 L_p^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中:  $\omega$  表示电流角频率。当均匀强度的激光脉冲照射到 PCSS 表面时,光生载流子的产生使 4H-SiC PCSS 的电导率急剧增加,导通电阻快速下降,此时 PCSS 光生载流子浓度  $n(t)$  的变化可以由式(3)中的连续性方程给出

$$\frac{\partial n(t)}{\partial t} = G(t) - \frac{n(t)}{\tau_s} \quad (3)$$

式中:  $G(t)$  和  $\tau_s$  是光生载流子的产生速率和复合时间。由于对电极上的银镜和轴向光反射阱,激光在 PCSS 晶片上的穿透次数为  $m$  次。因此,4H-SiC PCSS 光生载流子的产生速率  $G(t)$  可以由式(4)给出

$$G(t) = \frac{\eta T P(t)}{h\nu S d} (1 - e^{-mad}) \quad (4)$$

式中:  $h$  为普朗克常数;  $\nu$  为光频率;  $P(t)$  是输入光功率;  $\eta$  是光导半导体的量子效率;  $T$  是 4H-SiC PCSS 器件的表面透射率;  $\alpha$  是 4H-SiC 的线性吸收率;  $S$  是光路的横截面积;  $d$  是 4H-SiC PCSS 晶片的厚度。结合式(3)和式(4),我们可以得到

$$n(t) = \frac{\eta T}{h\nu S d} (1 - e^{-mad}) \int_{-\infty}^{t_0} P(t) e^{-\frac{t-t_0}{\tau_s}} dt \quad (5)$$

其中  $t_0$  是激光触发脉冲的脉宽。然后  $R_{PCSS}$  可以表示为

$$R_{PCSS} = \rho \frac{d}{S} = \frac{d}{n(t) q \mu S} = \frac{h\nu d^2}{\eta T q \mu (1 - e^{-mad}) \int_{-\infty}^{t_0} P(t) e^{-\frac{t-t_0}{\tau_s}} dt} \quad (6)$$

式中:  $\rho$  表示电阻率;  $q$  表示单个载流子的电荷量;  $\mu$  表示载流子迁移速度。根据式(2)和式(6),可以得到 PCSS 的等效阻抗。由式(7)可知,4H-SiC PCSS 晶片的厚度与 PCSS 的等效阻抗正相关。因此,在其他实验条件不变的情况下,输入光强越大,器件厚度越薄,等效阻抗越小。

$$|Z_{PCSS}| = \left[ \frac{h^2 \nu^2 d^4 (1 - 2\omega^2 L_p C_p) \left[ \eta T q \mu (1 - e^{-mad}) \int_{-\infty}^{t_0} P(t) e^{-\frac{t-t_0}{\tau_s}} dt \right]^2 + \omega^2 h^2 \nu^2 d^4 C_p^2}{\left[ \eta T q \mu (1 - e^{-mad}) \int_{-\infty}^{t_0} P(t) e^{-\frac{t-t_0}{\tau_s}} dt \right]^2 + \omega^2 h^2 \nu^2 d^4 C_p^2} + \omega^2 L_p^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

在图 3 中,测试电路的总阻抗由 PCSS, CVR 和负载电阻三部分组成,即

$$Z = Z_{PCSS} + R_{CVR} + R_L = \left( R_{CVR} + R_L + \frac{R_{PCSS}}{1 + (\omega C_p R_{PCSS})^2} \right) + j \left( \omega L_p - \frac{\omega C_p R_{PCSS}^2}{1 + (\omega C_p R_{PCSS})^2} \right) \quad (8)$$

如果高压偏置稳定,则可以直接在 CVR 上测量光电流 ( $I_{photo}$ )。而  $\frac{R_{PCSS}}{1 + (\omega C_p R_{PCSS})^2}$  与  $\frac{\omega C_p R_{PCSS}^2}{1 + (\omega C_p R_{PCSS})^2}$  相对于其他项近似为无穷小量,因此进行计算时将这两项省略。光电流  $I_{photo}$  大致表示为

$$I_{photo} = \frac{U}{|Z|} \approx \frac{U}{\left[ R_{PCSS}^2 + \omega^2 L_p^2 + (R_{CVR} + R_L)^2 \right]^{1/2}} \quad (9)$$

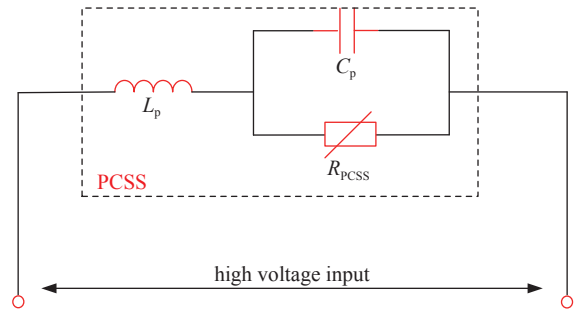


Fig. 2 Circuit structure of VCS14H-SiC PCSS

图 2 光导开关器件电参数等效示意图

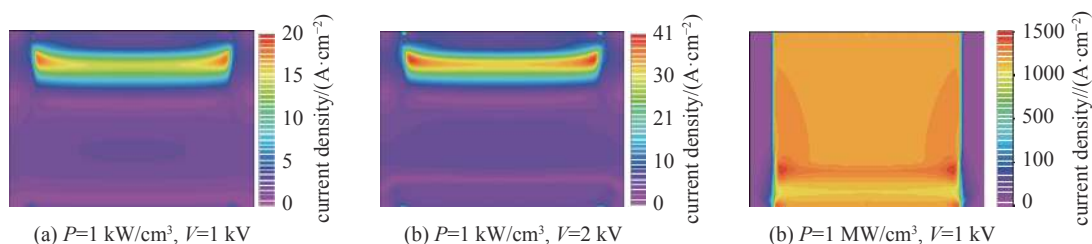


Fig. 3 Photocurrent density simulation of 4H-SiC PCSS ( $d=0.8$  mm)

图 3 4H-SiC 光导器件光生载流子分布仿真 ( $d=0.8$  mm)

4H-SiC PCSS 的阻抗和光电流可以由式(7)和(9)分别得到。在其他参数不变的情况下,对 4H-SiC PCSS 的电学特性进行了理论分析。从而可以得出:在保证半导体器件耐压能力的前提下,为了提高光电转化效率,器件的厚度要足够小。鉴于综合考虑,本实验选取 0.8 mm 厚度的 4H-SiC 光导半导体作为基底材料。

采用 Silvaco-TCAD 半导体模拟软件,对垂直电极结构的 4H-SiC PCSS 进行了模拟。在二维模拟中,下边缘是 4H-SiC PCSS 的接触电极,其余部分是 4H-SiC 衬底。假设 4H-SiC 半导体为 n 型掺杂,掺杂浓度为  $10^{16}$   $\text{cm}^{-3}$ ,阴极电压设为 1 kV。使用载流子散射迁移率模型、平行电场相关迁移率模型、Selberherr 碰撞电离模型和 SRH 复合模型来描述半导体载流子行为特性。瞬态特性的时间仿真范围为 0~1.75 ns,步长为 0.01 ns。分别模拟了器件中光生载流子的电流密度和浓度。在图 3 中,比较了不同偏置电压和光强对 4H-SiC 光导器件光电流密度的影响。仿真结果表明,光生载流子浓度与偏置电压、触发光强两个因素呈正相关。

### 3 MHz 超高重频亚纳秒脉冲发生器实验研究

输出光电流响应波形如图 4 所示。图中波形为 4H-SiC PCSS 在 1 MHz 超高重频下 CVR 测量的输出电流波形,重频波形抖动小于 100 ps。实验结果证明该系统得到稳定低抖动的 MHz 电脉冲输出。

首先分别使用半高宽为 0.3 ns 和 1.5 ns 的激光单脉冲开展触发实验,波形如图 5 所示。输出脉冲的半高宽分别为 365 ps 与 1.49 ns。随后,使用半高宽 500 ps 连续激光脉冲进行触发实验,得到的波形如图 6(a)所示。输出脉冲的半高宽约为 515 ps,调制深度情况较好。上述实验结果表明,超高重复频率亚纳秒脉冲发生器对不同脉宽的触发光脉冲都具有很好的响应性能,即高重复频率脉冲发生器的输出主频连续可调。

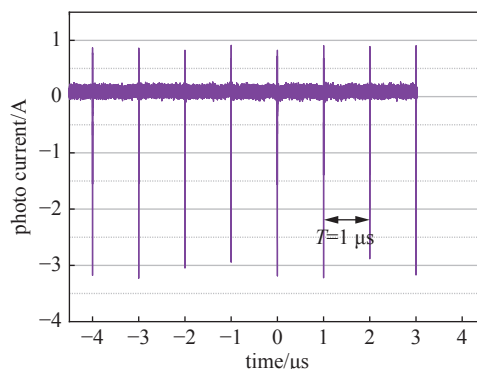
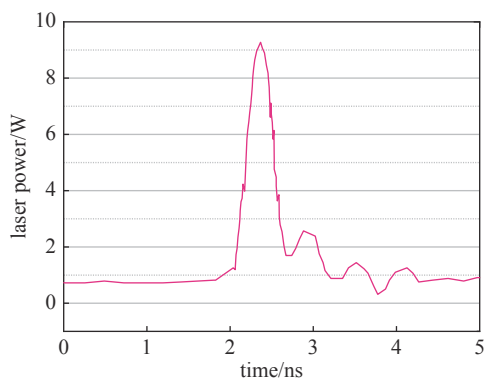


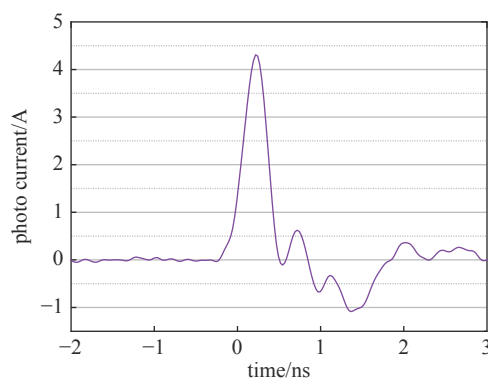
Fig. 4 Output current of 4H-SiC PCSS at 1 MHz ultra-high re-frequency

图 4 1 MHz 超高重频光电流输出波形图

在不同偏置电压与不同光功率条件下进行实验研究,实验输出波形如图 7 所示。可以看出对于偏置电压对于输出电压基本呈线性变化关系,而光功率对于输出幅值呈斜率逐渐增大的近似线性关系。当外加偏置电压上升到 16 kV,脉冲激光最大输出功率为 95.6 W 时,输出光电流约为 11 A,系统最大输出电功率为 176 kW。



(a) waveform of laser pulse ( $\tau=300$  ps)



(b) waveform of output photocurrent ( $\tau=300$  ps)

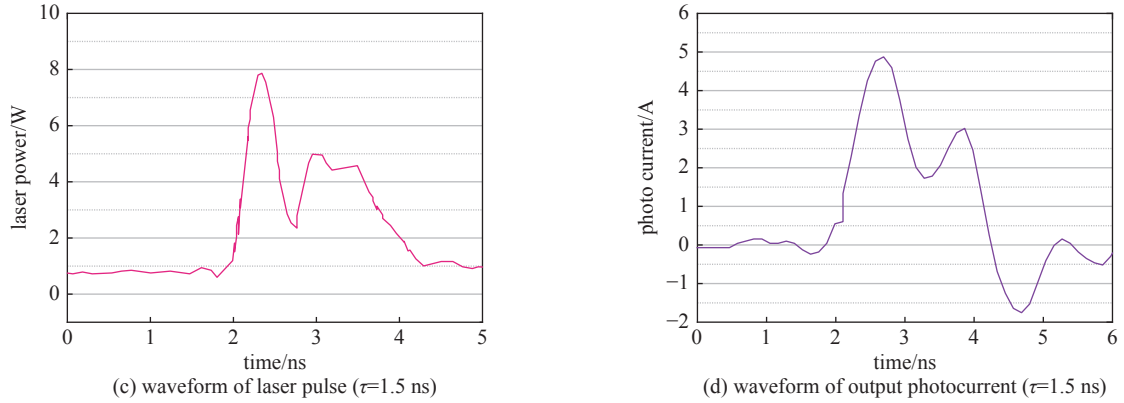


Fig. 5 Single photocurrent waveforms

图 5 单脉冲响应波形图

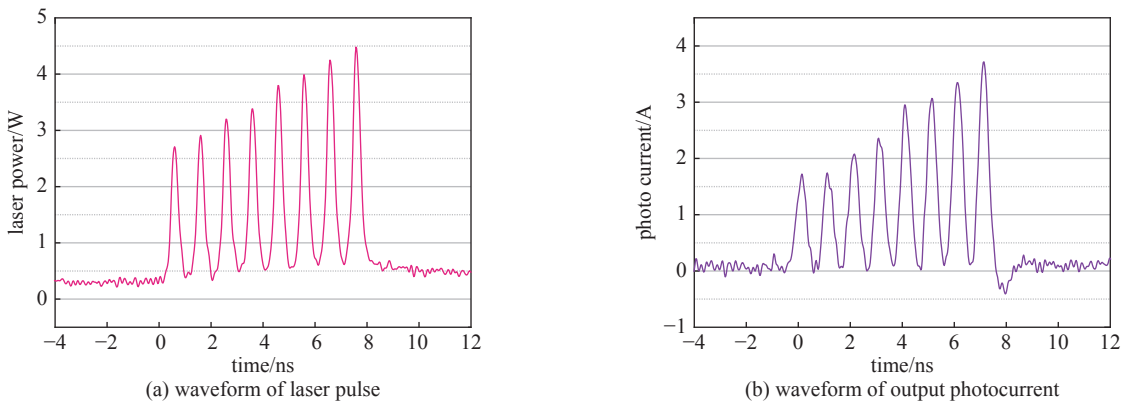


Fig. 6 Waveform of continuous laser pulse and output photocurrent for 500 ps laser triggering

图 6 500 ps 连续光脉冲波形与电路响应波形

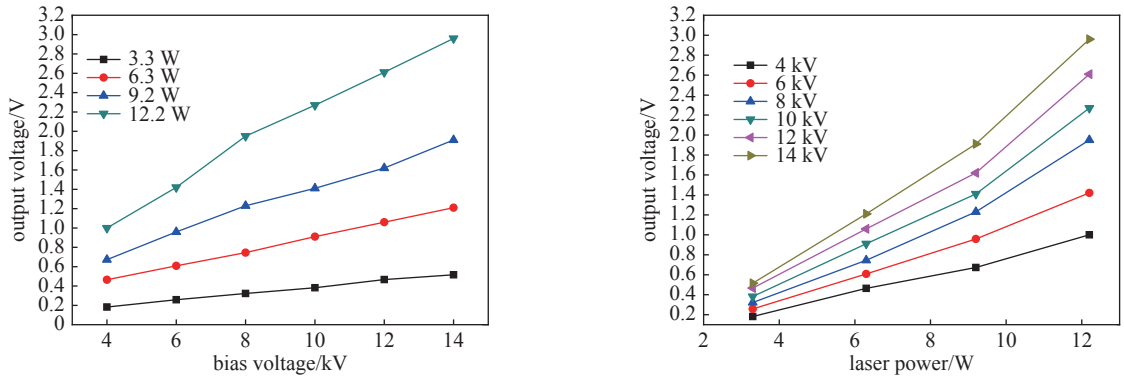


Fig. 7 Output photocurrent varying with bias voltage and pulse laser power

图 7 输出光电流与不同偏置电压/脉冲激光功率的关系

## 4 结论

本文研究了一种基于钒补偿 4H-SiC 光导半导体器件的超高重复频率亚纳秒脉冲发生器。该发生器采用 1 MHz, 1030 nm 可调谐光脉冲宽度的激光簇驱动源, 触发厚度 0.8 mm 的 4H-SiC PCSS, 可实现最大输出功率 176 kW、最小半高宽约为 365 ps、抖动小于 100 ps 的 MHz 重频短脉冲。实验中分别使用半高宽为 300 ps, 500 ps 以及 1.5 ns 三种不同类型的激光脉冲进行实验研究。结果表明, 超高重复频率亚纳秒脉冲发生器对不同脉宽的单脉冲/连续脉冲触发光都具有很好的响应性能, 证明该 MHz 高重频脉冲发生器的输出主频连续可调。

## 参考文献:

- [1] Benford J, Swegle J A, Schamiloglu E. High power microwaves[M]. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [2] 袁建强, 谢卫平, 周良骥, 等. 光导开关研究进展及其在脉冲功率技术中的应用[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(1): 171-176. (Yuan Jianqiang, Xie Weiping,



- Zhou Liangji, et al. Developments and applications of photoconductive semiconductor switches in pulsed power technology[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(1): 171-176)
- [3] 肖龙飞, 徐现刚. 宽禁带碳化硅单晶衬底及器件研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 040003. (Xiao Longfei, Xu Xiangang. Recent development of wide bandgap semiconductor SiC substrates and device[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 040003)
- [4] 罗燕, 丁蕾, 赵毅, 等. SiC光导开关衬底与电极界面场强仿真与优化设计[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 063004. (Luo Yan, Ding Lei, Zhao Yi, et al. Optimization design and simulation of electric field at interface between substrate and electrode of photoconductive switch[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 063004)
- [5] Sullivan J S. Wide bandgap extrinsic photoconductive switches[R]. Livermore: Lawrence Livermore National Lab. , 2013.
- [6] Wu Qilin, Xun Tao, Zhao Yuxin, et al. The test of a high-power, semi-insulating, linear-mode, vertical 6H-SiC PCSS[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2019, 66(4): 1837-1842.
- [7] Wu Qilin, Zhao Yuxin, Xun Tao, et al. Initial test of optoelectronic high power microwave generation from 6H-SiC photoconductive switch[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2019, 40(7): 1167-1170.
- [8] 王朗宁, 荀涛, 杨汉武. 正对电极结构碳化硅光导开关的电路模型[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(9): 2471-2476. (Wang Langning, Xun Tao, Yang Hanwu. Circuit modeling of vertical geometry SiC photoconductive semiconductor switches[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(9): 2471-2476)
- [9] Hu Long, Su Jiancang, Qiu Ruicheng, et al. Ultra-wideband microwave generation using a low-energy-triggered bulk gallium arsenide avalanche semiconductor switch with ultrafast switching[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018, 65(4): 1308-1313.
- [10] Wei Wei, Xia Liansheng, Chen Yi, et al. Research on synchronization of 15 parallel high gain photoconductive semiconductor switches triggered by high power pulse laser diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106: 022108.
- [11] Xiao Longfei, Yang Xianglong, Duan Peng, et al. Effect of electron avalanche breakdown on a high-purity semi-insulating 4H-SiC photoconductive semiconductor switch under intrinsic absorption[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(11): 2804-2808.
- [12] Chu Xu, Xun Tao, Wang Langning, et al. Breakdown behavior of GaAs PCSS with a backside-light-triggered coplanar electrode structure[J]. *Electronics*, 2021, 10: 357.
- [13] Wang Langning, Jia Yongsheng, Liu Jinliang. Photoconductive semiconductor switch-based triggering with 1 ns jitter for trigatron[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2018, 3(5): 256-260.
- [14] Wang Langning, Chu Xu, Wu Qilin, et al. Effects of high-field velocity saturation on the performance of V-doped 6H silicon-carbide photoconductive switches[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 9(4): 4879-4886.
- [15] He Xuan, Zhang Bin, Liu Shuailin, et al. High-power linear-polarization burst-mode all-fibre laser and generation of frequency-adjustable microwave signal[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2021, 9: e13.