

文章编号: 2095-4980(2016)03-0340-04

雪崩模式下的体结构 GaAs 光导开关

吴朝阳^a, 范昭奇^a, 陆巍^a, 杨周炳^a, 罗剑波^b

(中国工程物理研究院 a.应用电子学研究所 高功率微波技术重点实验室;
b.电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 利用能量较低的脉冲激光二极管, 在较高场强下触发 GaAs 光导开关, 使其工作于雪崩模式, 从而产生纳秒上升前沿的快脉冲电压。GaAs 光导开关采用垂直体结构设计, 芯片厚度为 2 mm, 电极形状分别为圆环和圆面, 触发光脉冲从圆环穿过。快脉冲产生由同轴 Blumlein 脉冲形成线完成。对基于 GaAs 光导开关的同轴 Blumlein 脉冲线进行了模拟仿真和实验, 当充电电压超过 8 kV(40 kV/cm)后, 开关开始了雪崩工作模式。当充电电压约为 15 kV(75 kV/cm)时, 在 50 Ω 负载上获得了约 11 kV 的脉冲电压, 实验波形与仿真波形一致。对开关抖动进行了测试, 其测试结果显示开关充电电压对抖动影响很大, 随着开关偏压增加, 开关抖动减小, 开关获得了最小抖动约 700 ps。

关键词: 砷化镓; 光导开关; 雪崩; 半导体二极管

中图分类号: TN365; TM836

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201603.0340

GaAs bulk PCSS under avalanche mode

WU Zhaoyang^a, FAN Zhaoqi^a, LU Wei^a, YANG Zhoubing^a, LUO Jianbo^b

(a.Science and Technology on High Power Microwave Laboratory, Institute of Applied Electronics; b.Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: By using laser diode with low energy to trigger GaAs Photoconductive Semiconductor Switch (PCSS) at high bias voltage, which makes GaAs PCSS working under avalanche mode, fast pulse voltage is produced. GaAs PCSS is designed as vertical bulk structure with 2 mm thickness. The electrodes are of round and doughnut configuration and the trigger light passes through the center of doughnut electrode. The fast pulse is achieved by coaxial Blumlein pulse form line. The simulation and experiment of coaxial Blumlein pulse form line based on GaAs PCSS is executed. When charge voltage exceeds 8 kV(40 kV/cm), the output voltage impulse increases rapidly and the rise time is shorter than that of laser impulse, which indicates PCSS turns into avalanche mode. When bias voltage is up to 15 kV(75 kV/cm), 11 kV voltage pulse is obtained under 50 Ω of load, which accords well with the simulation result. The switch jitter is tested, and the results show that the switch bias voltage has great influence on the switch jitter. As the switch bias voltage increases, the switch jitter decreases. When the bias voltage reaches 15 kV, the lowest jitter of 700 ps is obtained.

Key words: GaAs; Photoconductive Semiconductor Switch; avalanche; semiconductor diode

光导开关(PCSS)是基于半导体材料光电效应原理, 使材料从初始的绝缘状态转变到高电导状态的一种新型开关器件。自 1977 年 C H LEE 等人研制出 GaAs 光导开关以来^[1], 光导开关技术就一直飞速发展。光导开关与气体火花开关相比具有较高的工作频率和较低的开关抖动, 与半导体固态开关相比(如 MOSFET, IGBT 等), 具有较高的输出功率和较快的开关速度, 其利用脉冲激光进行触发的特点使其还具有良好的光电隔离, 这些优点使光导开关在诸如脉冲功率技术、太赫兹 (THz) 源、超宽带微波系统等领域得到了重要应用^[2-5]。1987 年美国圣地亚实验室 G M LOUBRIEL 等人发现了 GaAs 光导开关的非线性工作模式^[6], 即在较高场强下, 开关可以利用比线性模式低 3~5 个数量级的能量进行触发, 同时开关伴随有丝状电流^[7]。由于 GaAs 光导开关在较高场强下可以工作于非线性工作模式, 这使得利用半导体激光二极管触发光导开关成为可能^[8-9], 但同时也对开关的耐压有更高的要求。为了提高开关耐压水平, 通常采用较大间隙的开关结构^[10-11], 这又对开关沿面闪络抑制提出了挑战。

收稿日期: 2015-04-10; 修回日期: 2015-08-06

基金项目: 高功率微波技术重点实验室资助项目(2014HPM-01)

为了提高开关的耐压场强,本文利用 2 mm 厚半绝缘 GaAs 芯片设计了垂直体积结构的光导开关,并设计了同轴 Blumlein 脉冲形成线作为实验平台。对基于 GaAs 光导开关的同轴 Blumlein 线进行了模拟仿真,并利用低能量的脉冲激光二极管对开关进行了触发实验,获得了快脉冲输出,其输出波形与仿真波形基本一致。同时也对开关充电电压与开关抖动的影响关系进行了实验研究。

1 开关结构

实验中采用的光导开关为垂直结构,如图 1 所示。开关芯片选用半绝缘 GaAs 材料,晶片厚度为 2 mm,电阻率约 $1 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$,电子迁移率约 $4000 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 。电极形状为圆环和圆形,分别布置于芯片上下两面,位置正对,半导体激光二极管产生的脉冲激光从圆环中间穿过,实现对开关的触发,触发光源的传播方向与电场方向一致。电极材料选用 Au/Ge/Ni 合金,通过电子束蒸发、沉积以及高温退火等工艺在材料表面形成欧姆接触。开关芯片置于陶瓷基板上,通过导电胶与外电路连接。

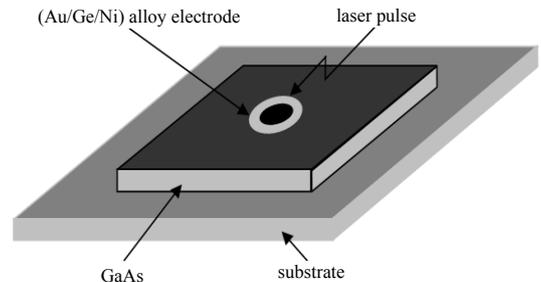


Fig.1 Schematic diagram of vertical bulk GaAs PCSS
图 1 垂直体结构 GaAs 光导开关示意图

2 同轴 Blumlein 脉冲形成线设计

实验中采用脉冲高压电源对 Blumlein 同轴传输线充电,Blumlein 同轴传输线起传输和储能的作用。同轴 Blumlein 线的设计如图 2 所示:

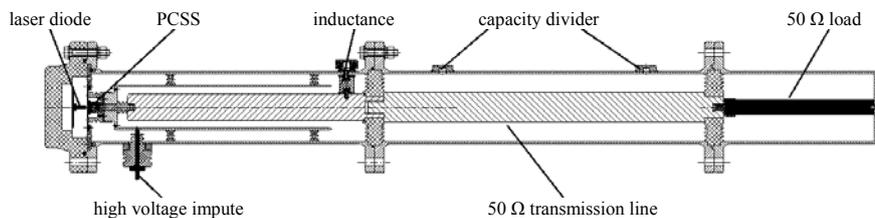


Fig.2 PCSS experimental facility
图 2 光导开关实验装置图

内筒外筒阻抗均为 25Ω ,长度为 0.3 m,由式(1)可知,在 50Ω 负载上获得的理性脉冲宽度为 2 ns。另外,由式(1)可知,作为储能功能,Blumlein 同轴线电容值约为 80 pF。

$$\tau = \frac{2l}{v} \tag{1}$$

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln\left(\frac{a}{b}\right)} \tag{2}$$

式中: l 为 Blumlein 同轴线长度; v 为光速; C_0 为单位长度同轴线分布电容; a 和 b 为同轴线的外筒和内筒半径。

开关实验原理如图 3 所示。信号延时控制器发出一路信号控制高压脉冲电源对 Blumlein 线充电,

当电压达到最大值时,信号延时控制器发出第二路信号触发激光二极管产生脉冲激光使开关导通,输出波形通过分压器、衰减器后进入示波器显示。实验中设计了 2 组完全一致的脉冲激光二极管驱动系统,一组用于触发光导开关,另一组通过光电探测器(DET10)将光信号转换为电信号,输入示波器用于开关抖动测试。

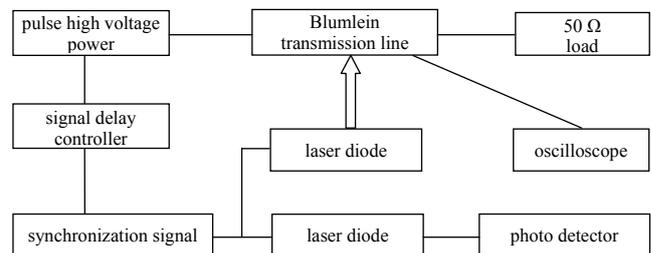


Fig.3 PCSS experiment principle
图 3 光导开关实验原理

3 实验结果及分析

实验中使用的光源为波长 905 nm 的脉冲激光二极管,脉冲前沿约为 50 ns,脉冲宽度约为 150 ns,利用光能计测试其单脉冲输出能量约为 $17 \mu\text{J}$,其输出光波形如图 4 所示。

在开关两端加上脉冲高压，其随着偏置升高，开关输出也逐渐增加，当开关偏置电压超过 8 kV(40 kV/cm)时，其输出脉冲幅度明显增加，波形如图 5 所示。

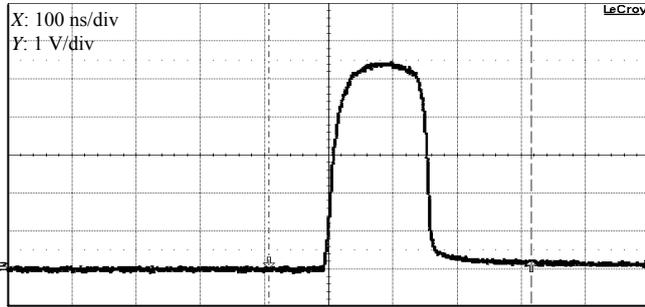


Fig.4 Pulse laser diode output waveform
图 4 脉冲激光二极管输出光波形

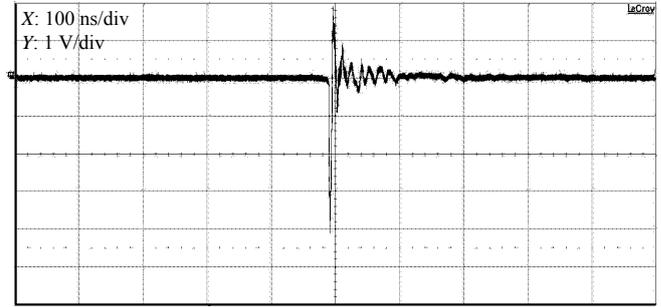


Fig.5 PCSS output waveform under avalanche mode
图 5 光导开关雪崩工作模式下的输出波形

由图 5 可知，开关输出脉冲前沿约为 2 ns，半高宽约为 4 ns，明显小于光脉冲前沿和脉宽，表明开关工作于雪崩模式。随着开关偏压的增加，开关输出幅值也线性增加，但开关输出波形没有变化，脉冲前沿和半高宽保持一致。当偏压约 15 kV(75 kV/cm)时，开关输出电压脉冲幅度约 11 kV。如图 6 所示，图中波形幅值约为 850 mV，测试使用的衰减器为 20 dB，分压器分压比约 1 300 倍。

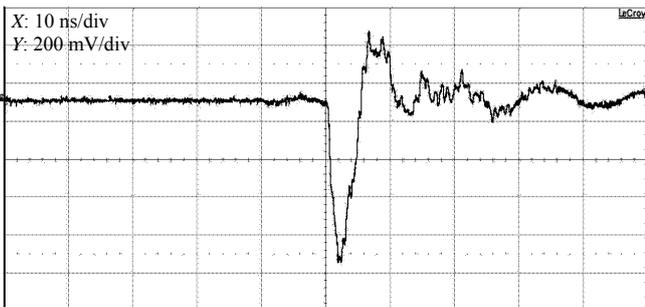


Fig.6 11 kV output voltage on load when charging voltage reaching 15 kV
图 6 充电达到 15 kV 时负载上获得 11 kV 输出电压

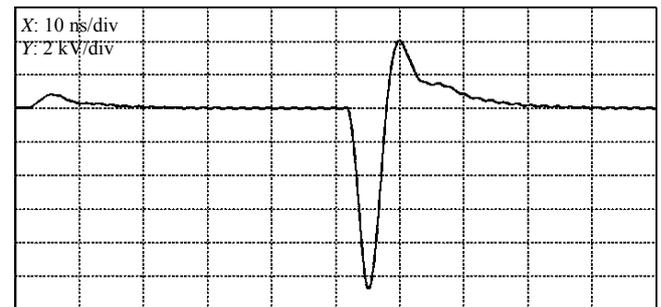


Fig.7 Simulation output waveform when charging voltage reaching 15 kV
图 7 充电电压达到 15 kV 时的仿真输出波形

从图 5 及图 6 可以看出，开关在 50 Ω 负载上并未产生 2 ns 脉冲宽度的方波，负载上得到的电压幅值也未达到充电电压。由式(3)可知，当 Blumlein 同轴传输充电到 15 kV 时，其存储的能量约为 0.9×10^{-2} J。由式(4)可以看出，理论上在 50 Ω 负载上获得的电压应为 10.6 kV，这与实验值相近。由于开关电感以及系统结构电感的限制，开关上升前沿增大(大于设计脉冲宽度)，从而导致在负载上获得的脉冲未能达到或接近充电电压幅值。

$$E = \frac{1}{2} C U_0^2 \quad (3)$$

$$U_{\text{load}} = \sqrt{\frac{E \times R}{\tau}} \quad (4)$$

式中： E 为能量； C 为 Blumlein 传输电容； U_0 为充电电压； U_{load} 为负载电压； τ 为脉冲半高宽； R 为负载电阻。

利用 CST 软件对同轴 Blumlein 传输线进行建模和全波仿真，在充电 15 kV 时，50 Ω 负载上获得的输出波形约 11 kV，与实验波形基本一致，如图 7 所示。这进一步证明了开关及结构电感导致脉冲电压前沿变慢是输出电压未能达到充电电压的主要原因。

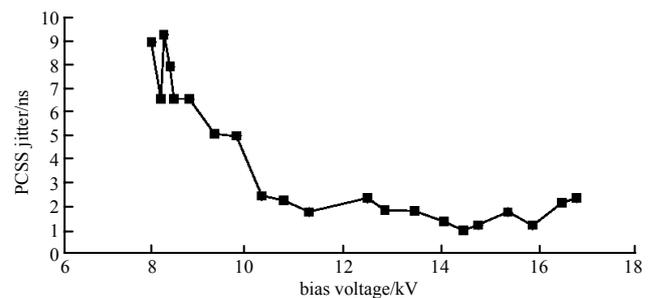


Fig.8 Relationship between bias voltage and jitter
图 8 开关抖动和偏置电压关系

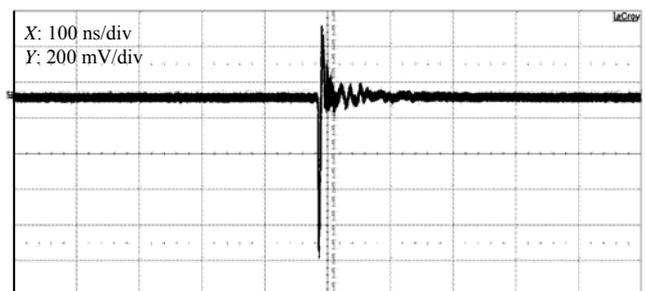


Fig.9 Output waveform superposition of 20 times PCSS triggering
图 9 光导开关 20 次触发后输出波形叠加

抖动是光导开关性能的一个重要参数,在线性工作模式下,光导开关抖动取决于触发光脉冲的抖动,而在雪崩工作模式下,开关抖动与偏置电压有关。在不同偏置电压下对开关抖动进行了测试,结果如图8所示。开关的抖动是通过计算触发光脉冲与输出电压脉冲之间的时间差而获得的,由示波器直接读出,每改变一次偏置电压记录20次输出波形。从图上可以看出,在较高充电电压下开关抖动明显降低,在15 kV左右,开关获得了最低抖动,约700 ps,当电压超过15 kV时,开关抖动又开始增大。在15 kV,开关20次输出波形如图9所示。

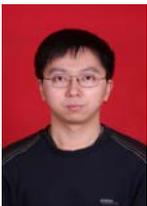
4 结论

在厚度为2 mm的GaAs晶圆片上设计了垂直体结构光导开关,并设计了同轴Blumlein传输。利用半导体激光二极管实现了对开关的触发。当偏置电压超过8 kV(40 kV/cm)后,开关开始工作于雪崩模式,在负载上获得了快脉冲输出。随着偏置电压的增加,输出脉冲幅度线性增加,但其前沿和半高宽保持一致,与偏置电压的变化无关。当充电电压约为15 kV(75 kV/cm)时,开关输出约11 kV,与仿真波形一致,开关电感与传输线结构电感使开关前沿变慢是导致开关输出未能达到充电电压的主要原因。对开关抖动进行了测试,发现偏置电压的增加可以较为明显地减小开关抖动,当开关充电电压约为15 kV时,获得了最小700 ps的开关抖动。

参考文献:

- [1] LEE C H. Picosecond optoelectronic switching in GaAs[J]. Applied Physics Letters, 1977,30(2):84-86.
- [2] NUNNALLY W C. Critical component requirements for compact pulse power system architectures[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2005,33(4):1262-1267.
- [3] MOUROU G, STANCAMPIANO C V, BLUMENTHAL D. Picosecond microwave pulse generation[J]. Applied Physics Letters, 1981,38(6):470-472.
- [4] SCHOENBERG J H, BURGER J W, TYO J S, et al. Ultra-wideband source using gallium arsenide photoconductive semiconductor switches[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1997,25(2):327-334.
- [5] ZUTAVERN F J, ARMILLO J C, CAMERON S M, et al. Optically activated switches for low jitter pulsed power applications[C]// Proc of 14th IEEE IPPC. 2003:591-594.
- [6] LOUBRIEL G M, OMALLEY M W, ZUTAVERN F J. Toward pulsed power uses for photoconductive semiconductor switches: Closing switches[J]. IEEE Pulsed Power Conference Arlington Virginia, 1987:145-148.
- [7] ZUTAVERN F J, BACA A G, CHOW W W, et al. Semiconductor lasers from photoconductive switch filaments[C]// Digest of Technical Papers, Pulsed Power Plasma Science, 2001. Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2001:170-173.
- [8] 吴朝阳, 陈志刚, 薛长江, 等. 半导体激光器触发光导开关实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2012,24(3):635-638. (WU Zhaoyang, CHEN Zhigang, XUE Changjiang, et al. Experimental research on GaAs photoconductive semiconductor switches triggered by laser diode[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012,24(3):635-638.)
- [9] SHI Wei, JIANG Huan, LI Mengxia, et al. Investigation of electric field threshold of GaAs photoconductive semiconductor switch triggered by 1.6 J laser diode[J]. Applied Physics Letters, 2014,104(104):042108-042108-3.
- [10] 袁建强, 刘宏伟, 刘金锋, 等. 50 kV 半绝缘 GaAs 光导开关[J]. 强激光与粒子束, 2009,21(5):783-786. (YUAN Jianqiang, LIU Hongwei, LIU Jinfeng, et al. 50 kV semi-insulating GaAs photoconductive semiconductor switches[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009,21(5):783-786.)
- [11] 李寅鑫, 苏伟, 刘娟. 异面结构 GaAs 光导开关耐压特性研究[J]. 传感器与微系统, 2009,28(6):16-17,21. (LI Yinxin, SU Wei, LIU Juan. Research on withstand voltage characteristics of opposed contacts GaAs PCSS[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2009,28(6):16-17,21.)

作者简介:



吴朝阳(1983-),男,四川省遂宁市人,硕士研究生,主要从事脉冲功率技术及高压开关技术研究.email:wzyx0208@163.com.

陆巍(1973-),男,江苏省张家港市人,高级工程师,主要从事脉冲形成技术研究。

杨周炳(1968-),男,四川省绵阳市人,高级工程师,主要从事脉冲形成技术研究。

范昭奇(1982-),男,四川省广安市人,助理研究员,主要从事半导体开关技术研究。

罗剑波(1964-),男,四川省剑阁县人,工程师,主要从事微电子工艺技术研究。