

文章编号: 1000-324X(2008)03-0425-04

超快大功率 SiC 光导开关的研究

严成锋, 施尔畏, 陈之战, 李祥彪, 肖 兵

(中国科学院 上海硅酸盐研究所, 上海 200050)

摘 要: 选用钒掺杂浓度为 0.2at% 的高质量 6H-SiC 晶体, 电阻率为 $7.0 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$, 研制出超快大功率 SiC 光导开关. 在脉冲宽度为 20ns 的光源激发下, 分别测试了在不同的偏置电压和光能条件下开关的电脉冲输出特性. 结果表明: 1mm 电极间隙的 SiC 开关器件的性能优越, 耐偏压高, 光导电脉冲的上升时间快 (6.8ns), 脉宽 <20ns, 稳定性好. 负载为 40Ω 的电阻上输出线性电脉冲电压随开关的偏置电压和光强增大而增大, 在 2.5kV 的偏置电压下, 最大瞬时电流约为 57.5A, 瞬时功率高达 132kW.

关 键 词: 碳化硅; 钒掺杂; 半绝缘; 光导开关

中图分类号: TN305 **文献标识码:** A

Super Fast and High Power SiC Photoconductive Semiconductor Switches

YAN Cheng-Feng, SHI Er-Wei, CHEN Zhi-Zhan, LI Xiang-Biao, XIAO Bing

(Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: High-power photoconductive semiconductor switches (PCSS) were fabricated on 0.2at% vanadium-doped semi-insulating 6H-SiC ($7.0 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$). V-doped 6H-SiC PCSS with 1mm gap displays a fast rise time (6.8ns), short photoconductivity pulse width (less than 20ns) and high-speed photovoltaic response to 20ns laser pulse. The experimental results show that the linear peak voltage is increased with increasing bias voltage and excitation energy. The typical maximum photocurrent of the device at 2.5kV is about 57.5A, the peak electrical power delivered to a 40Ω load is 132kW.

Key words: silicon carbide; vanadium-doped; semi-insulating; photoconductive semiconductor switches

1 引言

自从 1975 年美国 Bell 实验室 Auston 等人研制出硅光导开关以来^[1], 光导开关 (PCSS) 在高功率微波、超短超快电脉冲等众多领域, 特别是超宽高分辨率冲击雷达、高精度卫星定位和跟踪系统、导弹拦截系统、激光核聚变系统、电子对抗及电子战系统和反隐形技术等表现出诱人的应用前景. 与传统的气动开关及机电开关相比, PCSS 具有极其优良的特性, 如开关速度快、传输功率大、同步精度高、光电隔离好、触发动作小、器件结构简单、使用寿命长等, 可以应用在开关精确性高、功率大、噪音高的环境中^[2,3]. 光导开关材料的发展曾经历了 Si、GaAs、金刚石、InP 等^[4-7], 但由于 Si 的

禁带宽度窄, 载流子迁移率低等缺点不适合制作超快大功率光导开关. 金刚石虽然有比较高的禁带宽度和热导率, 但由于材料价格昂贵目前作为超快光导材料显然也不合适. 虽然 GaAs 的大暗态电阻率和宽禁带无疑有利于制作大功率器件, 但是由于 GaAs 热导率低、抗高辐射性能较差, 运行过程中容易产生热奔和锁定效应, 限制了 GaAs 光导开关在高温、高重复速率、高功率和高辐射环境中的使用. 近年来, 由于大尺寸、高质量的半绝缘 SiC 材料的发展, SiC 晶体具有优异物理及半导体性能, 它在大功率器件的研究受到了广泛的重视, 目前美国的 NASA, LLNL 等研究机构和大学正在积极开展 SiC 光导开关的研究工作, 并已在三维激光雷达

收稿日期: 2007-06-06, 收到修改稿日期: 2007-08-17

基金项目: 国家 863 计划 (2006AA03A146); 中国科学院知识创新工程项目 (KGCX2-YW-206); 上海市自然科学基金 (06ZR14096)

作者简介: 严成锋 (1979-), 男, 助理研究员. E-mail: ychf7906@hotmail.com 通讯联系人: 陈之战, E-mail: zzchen@mail.sic.ac.cn

等军事领域中得到应用^[8-10]. 我国由于受到半绝缘 SiC 晶体生长工艺及晶体质量的限制, SiC 光导开关的研究至今未见报道.

本工作采用中国科学院上海硅酸盐研究所生长的高质量掺钋半绝缘 6H-SiC 晶体制作光导开关. 通过晶体样品的表面处理、欧姆电极制作、开关结构设计, 研制出了超快大功率 SiC 光导开关, 测试了不同偏置电压和光能条件下开关的电脉冲输出特性.

2 实验

2.1 材料选取及处理

SiC 光导开关所用的半绝缘 SiC 晶片是由中国科学院上海硅酸盐研究所通过物理气相输运 (PVT) 法生长的^[11]. 在 SiC 原料中掺入 0.1at%、0.2at% 和 0.3at% 的高纯碳化钋, 通过钋掺杂获得半绝缘 6H-SiC 晶体, 晶片样品沿垂直于晶体 c 轴方向切割, 晶面为 (0001), 双面抛光后厚度为 0.5mm, 外形尺寸为 10.0mm×10.0mm, 通过 AFM 检测晶体的表面粗糙度 $R_a < 0.5\text{nm}$. 为了去除表面氧化层及加工过程中形成的亚损伤层, 钝化晶片表面, SiC 晶片在 1000°C 下进行 15h 的表面高温氢气退火处理, 然后浸入 200°C 熔融 KOH 熔液中刻蚀 3min, 最后放入稀 HF 中浸泡 12h, 取出后按照 RCA 清洗技术对材料进行清洗, 为制作器件电极作好准备, 详细的清洗工艺可参考文献 [12].

2.2 电极制作及参数

实验制作的器件采用横向电极结构, 合金电极设计的间隙为 1mm, 宽度为 3mm. 为了保证电极与 SiC 之间的欧姆接触, 首先采用磁控溅射在 SiC 基片上溅射 Ni(75nm)/Ti(50nm) 薄膜, 再用电子束蒸发法镀上 Au(120nm) 膜, 最后在 900°C 的氮气气氛下 2min 快速退火. SiC 基片上合金电极形状示意图如图 1 所示, 欧姆接触情况可通过直流偏置下晶片电极间的伏安特性 ($I-V$) 来验证.

2.3 测试线路及激光源参数设计

由于 6H-SiC 的禁带宽度 E_g 为 3eV, 激光源的激励波长 λ 应小于 380nm. 实验选用波长为 248nm、能量为 0.4~10.0mJ、脉宽为 20ns、重复频率为 1~600Hz 的 KrF(氟化氪) 准分子激光器作为触发源, 对 1mm 电极间隙的 SiC PCSS 进行实验.

如图 1 所示, 实验电路为普通型微带铜电路, 芯片与电路通过导电胶连接. R_L 为 10M Ω , 与开关并联的电容 C_L 规格为 103Z/3kV, 高压电源 V_{DC} 的

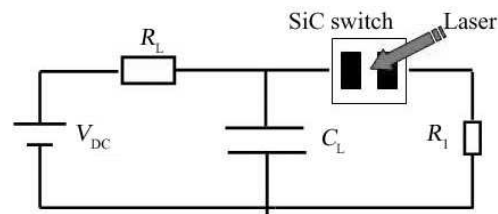


图 1 利用激光激励 SiC 光导开关结构和测试电路示意图

Fig. 1 Laser-triggered 6H-SiC PCSS structure and test circuit

可调电压为 1~5kV. 本实验的测试数据是通过与开关串联的敏感小电阻 R_1 (电阻值为 50 Ω) 上获得的. 由于开关输出的电脉冲瞬态幅值一般很大, 超出了示波器的量程, 因此通常要在光导开关输出端与示波器之间插入一个高倍率宽带衰减器. 实验所用的衰减器为衰减 100 倍的 Tektronix P5100 无源高压探头. 在不同偏置电压和不同入射光能量条件下, 衰减 100 倍后的开关电脉冲波形用带宽 350 MHz 的 TDS3032 双踪数字存储示波器显示、测量.

3 结果和讨论

Si、GaAs 和 SiC 材料在光导开关应用的相关物理特性的参数比较如表 1 所示, 室温下 SiC 晶体的禁带宽度、饱和电子漂移速率及热导率等都比 Si、GaAs 大得多, 使得 SiC 成为制作可用于高温、高压、高速、高频、高功率和高辐射环境中的大功率器件的首选材料.

国外在本征半绝缘 SiC 晶体材料上已成功实现了高效光导开关光脉冲信号的输出, 但国内由于受原材料纯度、生长设备及条件等的限制, 目前还无法生长出高阻值的本征半绝缘 SiC 晶体材料, 无法满足高功率光导开关器件对半绝缘材料的电阻要求. 中国科学院上海硅酸盐研究所通过 PVT 法制

表 1 Si、GaAs 和 SiC 材料的物理特性比较^[1-11]

Table 1 Comparison of the relevant physical properties of Si, GaAs and SiC^[1-11]

Parameter	Si	GaAs	6H-SiC
Band gap/eV	1.12	1.42	3.02
Thermal conductivity/ $\text{W}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	1.3	0.6	5~7
Max drift velocity/ $10^7\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	1.0	2.0	2.5
Breakdown field/ $10^6\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$	0.2	0.25	4~6
Resistivity/ $\Omega\cdot\text{cm}$	10^4	10^7	10^8
Melting temperature/ $^{\circ}\text{C}$	1690	1510	3100
Dielectric constant	11.8	10.9	9.66

备的本征 SiC 晶体的最大电阻率也仅为 $5.0 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ 左右, 因此本实验通过掺杂钒离子来提高晶体的电阻率, 生长的钒掺杂 SiC 晶体的掺杂量分别为 0.1at%、0.2at%、0.3at%, 霍尔效应 (Hall) 测试三个晶体的电阻率分别为 1.6×10^4 、 7.0×10^8 和 $2.9 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$, 本次实验选择钒掺杂浓度为 0.2at% 的晶体作为光导开关晶片。

在直流偏置下对开关的暗态伏安特性进行了测试, 其中钒掺杂量为 0.2at% 的半绝缘 SiC 晶片的暗态电流随电压的变化曲线如图 2 所示, 开关表现为经过坐标原点的线性伏安特性, 可见 Ni(75nm)/Ti(50nm)/Au(120nm) 合金化电极与 SiC 间具有良好的欧姆接触。

考虑到实验中光导开关的电极采用横向结构, 间隙仅为 1mm, 而空气的击穿电压为 30kV/cm, 当外加的偏置电压设置 $>3\text{kV}$ 时, 空气电离击穿表现为沿 SiC 晶片表面电极闪络放电。因此实验所选择的偏置电压不大于 2.5kV。为观测 1mm 电极间隙光导开关在光脉冲为 20ns 激光激励下的电脉冲信号, 首先选择在偏置电压为 2.5kV(对应 25kV/cm)、入射光能量为 5mJ 的条件下, 在 R_1 电阻上进行测量负载输出峰值电压的实验结果(衰减器对输出电压衰减了 100 倍)。如图 3 所示, 开关的上升沿极为陡峭, 上升时间约为 6.8ns, 与激光光脉冲的上升沿相符; 下降时间为 12ns, 电脉冲的宽度略小于 20ns。这是由于用 248nm 波长的光照射 SiC 晶片时, 在极短的时间内, 材料体内产生大量的电子-空穴对, 在偏置的外场电压作用下定向移动, 使 PCSS 的电阻率骤降, 从阻断态转换成导通态, 电脉冲电压的上升时间由光脉冲的上升时间决定。但当光撤去后, 由于载流子复合, 半导体又很快恢复到原来的阻断状态, 其恢复的快慢主要取决于半导体材料的载流子寿命^[13]。因此, 如果给半导体加以电场同时施加一个很窄的光脉冲, 就可以得到一个上升沿

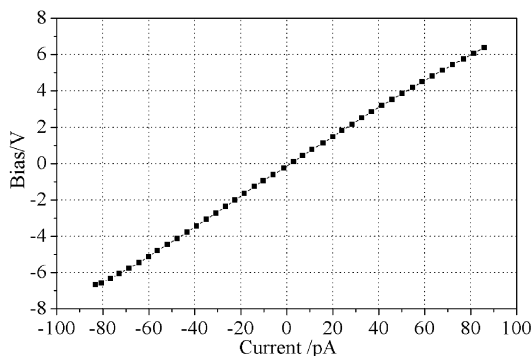


图 2 开关的暗态伏安特性

Fig. 2 $I - V$ characteristics of the SiC PCSS

更陡宽度更窄的电脉冲。

图 4 示出了入射光能量不变 (5mJ), 而偏置电压从 1kV 逐渐增加到 2.5kV (相应的暗态平均电场约为 10kV/cm 到 25kV/cm) 时得到的线性电脉冲图。随着偏置电压的增大, 电阻为 40Ω 的 R_1 上产生的电脉冲电压峰值也从原来的 680V 增大到 2300V, 而且并未达到饱和, 说明此开关可以耐更高的偏压, 这时 R_1 上输出的瞬时电流约为 57.5A, 所产生的电脉冲功率高达 132kW。图 5 示出偏置电压保持 500V (平均电场为 5kV/cm) 不变, 入射光能量从 0.5mJ 增加到 2.0mJ 获得的线性电脉冲图, 电脉冲输出的峰值电压随入射光能的增大而增大。可见, 电脉冲输出电压随开关的偏置电压和光强增加而增大, 而开关输出电脉冲的上升沿则基本不变。

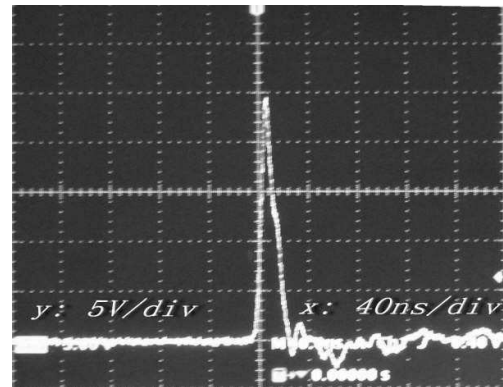


图 3 偏置电压为 2500V(对应 25kV/cm)、入射光能量为 5mJ 的条件下, SiC 光导开关的输出电脉冲波形
Fig. 3 Output peak voltage measured with a 100 \times attenuator, the bias voltage is 2500V, laser pulse energy is 5mJ (y: 5V/div, x: 40ns/div)

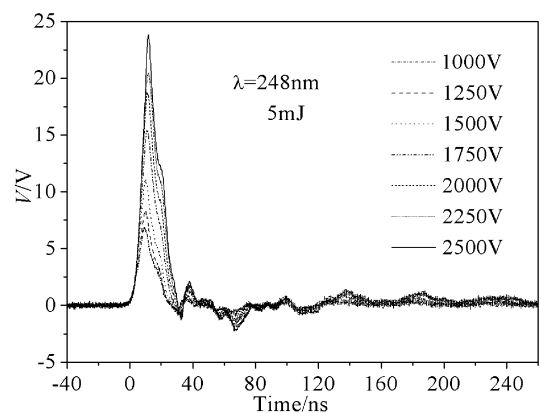


图 4 不同偏置电压下测量的输出电脉冲信号(衰减 100 倍)

Fig. 4 Output peak voltage of 1mm gap lateral SiC PCSS at different bias voltages(100 \times attenuation factor)

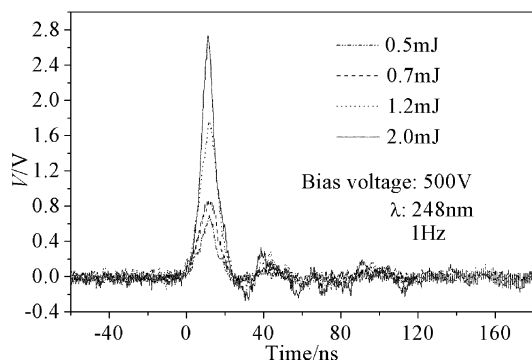


图 5 不同入射光能下测量的输出电脉冲信号 (衰减 100 倍后)

Fig. 5 Output peak voltage of 1mm gap lateral SiC PCSS with increasing laser pulse energies(100×attenuation factor)

4 结论

采用 PVT 法生长的钒掺杂浓度为 0.2at% 的半绝缘 6H-SiC 晶体, 研制出横向型超快大功率 SiC 光导开关. 在 2.5kV 偏置电压下光导实验测试表明 1mm 电极间隙的 SiC 开关器件的性能优越, 开关在 20ns 激光脉冲触发下, 开关输出电磁脉冲无晃动, 上升时间快 6.8ns, 脉宽 <20ns, 稳定性好. 负载为 40Ω 的电阻上输出线性电脉冲电压峰值随开关的偏置电压和光强增加而增大, 在 2.5kV 的偏置电

压下, 输出的瞬时电流约为 57.5A, 电脉冲功率达 132kW.

参考文献

- [1] Auston D H. *Appl. Phys. Lett.*, 1975, **26** (3): 101–103.
- [2] Lee C H. *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **30** (2): 84–86.
- [3] Loubriel G M, Zutavern F J, Baca A G, *et al. IEEE Trans. Plasma Science*, 1997, **25** (2): 124.
- [4] Zhao H, Hadizad P, Hur J H, *et al. J. Appl. Phys.*, 1993, **73** (4): 1807.
- [5] 鲍吉龙, 石顺祥, 许长存, 等, 激光杂志, 1997, **18** (1): 21–24.
- [6] 施卫, 梁振亮, 徐传骧. 西安交通大学学报, 1998, **32** (8): 19–23.
- [7] 杨春, 杨宏春, 吴明和, 等. 压电与声光, 2004, **26** (6): 444–446.
- [8] Neudeck P G. *Institute of Physics Conference Series* 141, San Diego, CA, 1994. 1–6.
- [9] Dogan S, TeKe A, Huang D, *et al. Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82** (18): 3107–3109.
- [10] Zhu K, Dogan S, Moon Y T, *et al. Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**: 261108.
- [11] Li Xiang-Biao, Shi Er-Wei, Chen Zhi-Zhan, *et al. Diamond & Related Materials*, 2007, **16** (3): 654–657.
- [12] 张厥宗. 硅单晶抛光片的加工技术. 北京: 化学工业出版社, 2005. 153–165.
- [13] 李源, 刘庆纲, 匡登峰, 等. 仪器仪表学报, 2003, **24** (4): 484–490.