

# 一种新型的大功率半绝缘GaAs光导开关试验研究

栾崇彪，冯元伟，李玺钦，李洪涛，黄宇鹏

中国工程物理研究院 流体物理研究所 脉冲功率科学与技术重点实验室，绵阳 621900

**摘要：**本文设计了一种低欧姆接触电阻率的半绝缘GaAs光导开关，开关由0.6mm厚的半绝缘GaAs材料制作，电极间隙为10mm，开关电极面制作高反膜，背面制作增透膜，使用波长1064nm、能量5.4mJ、触发激光脉宽25ns的激光脉冲触发光导开关，在直流电压6kV时，通过计算得到光导开关的导通电阻仅为0.61Ω。为了增大单只光导开关导通电流，设计了一种叉指状电极结构的光导开关，指状电极间隙2mm，在工作电压2kV时，导通电阻为0.35Ω。

**关键词：**GaAs，光导开关，导通电阻

## 1 引言

光控半导体开关（photoconductive semiconductor switches，简称PCSS）是在微电子技术、激光技术和微波技术的基础上发展起来的一种新型半导体光电器件，被广泛应用于产生高功率超快电脉冲。<sup>[1,2]</sup>PCSS具有结构紧凑、闭合时间短、开关抖动小、同步精度高、光电隔离等优点，在紧凑型、高重频固态脉冲功率源中日益受到重视。<sup>[3]</sup>1987年，G. M. Loubriel等人发现GaAs PCSS存在lock-on非线性输出模式，该模式下触发激光能量仅为线性模式下的0.001%~0.01%，可使用激光而激光代替YAG激光器，使得基于PCSS的紧凑型、高重频脉冲功率源可以实现。<sup>[4,5]</sup>目前，大功率GaAs光导开关导通电阻仍然较大，这主要由两方面原因造成：一是开关制作过程中欧姆接触电阻较大；二是GaAs材料光吸收效率低，光生载流子浓度低。光导开关较大的导通电阻会导致光导开关工作状态下焦耳加热现象的发生，造成光导开关的热损伤和热击穿。<sup>[6]</sup>本文设计了一种新型的光导开关欧姆接触电极结构，并通过蒸镀增透膜和高反膜的方式增加了GaAs材料对1064nm激光的吸收效率，降低了光导开关导通电阻。

## 2 实验

GaAs材料由于其禁带中的碳杂质被深能级施主EL2补偿而具有半绝缘特性，制作光导开关的半绝缘GaAs材料电阻率大于 $3 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ ，载流子浓度

为 $3.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ，迁移率为 $6500 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ，厚度为600μm。同面结构的GaAs光导开关如图1(a)所示，图1(b)为叉指状电极结构的光导开关。光导开关制作过程中，首先在GaAs材料表面通过MOCVD的方法外延生长一层n<sup>+</sup>-GaAs层，掺杂浓度大于 $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ，通过湿法刻蚀的方法将电极区域外的高掺杂n<sup>+</sup>-GaAs层去除，然后通过电子束蒸发的方式将Ge/Au/Ni/Au金属依次淀积到n<sup>+</sup>-GaAs层表面，电极间隙为10mm，尺寸为10mm×5mm。通过快速热退火的方式形成欧姆接触，通过TLM方法测试得到欧姆接触电阻率小于 $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。我们制作了两种构型的GaAs光导开关：一种在光导开关电极面制作高反膜，电极背面制作增透膜；另一种没有制作高反膜和增透膜。

光导开关实验测试电路如图2所示。采用固态脉冲形成线对光导开关进行测试，装置中使用的固态脉冲形成线的电极尺寸均为290mm×20mm×4mm，LCR测试电容值为6.5nF，计算可得固态脉冲形成线阻抗约为2.8Ω，输出脉宽约为44ns。在高压直流电源对光导开关加载电压的情况下，使用1064nm、能量为5.4mJ、触发光脉宽为25ns的Nd:YAG激光器触发光导开关。为了降低回路电流，采用了非阻抗匹配电路，负载R<sub>load</sub>阻值为10Ω。使用Pearson线圈测量光导开关的导通电流，线圈灵敏度为0.1V/A；光导开关加载电压以及输出电压通过Tek P6015A高压探头测量；本文中的光导开关实验数据均是在空气中测试得到。

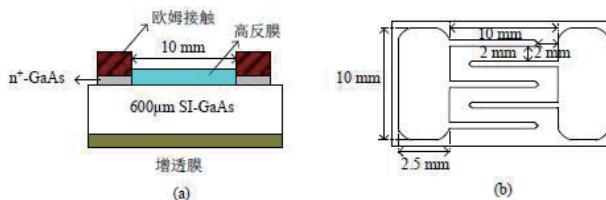


图 1 横向结构 (a) 和叉指状电极结构 (b) 的 GaAs 光导开关

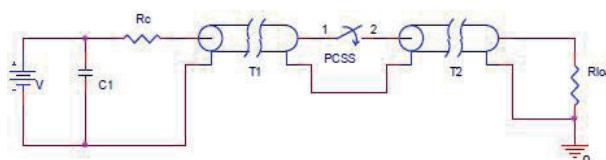


图 2 GaAs 光导开关测试电路图

### 3 结果与讨论

图 3 (a) 为没有制作高反膜和增透膜的 GaAs 光导开关在输入电压 6kV 时测得的光导开关加载电压、输出电压以及负载电流波形图；图 3 (b) 为制作了高反膜和增透膜的 GaAs 光导开关在输入电压 6kV 时测得的光导开关加载电压、输出电压以及负载电流波形图。从图 3 中可以看出：制作了高反膜和增透膜的 GaAs 光导开关在相同的输入电压下，开关输出电压和负载电流均较大。可以由  $R_{on} = (U_i - U_o) / I_{PCSS}$  简单计算得到 GaAs 光导开关的导通电阻  $R_{on}$ ，其中  $U_i$  为光导开关导通时的输入电压值， $U_o$  为光导开关输出电压值， $I_{PCSS}$  为光导开关上通过的最大光电流。计算可得：没有制作高反膜和增透膜的光导开关导通电阻约为  $3.3\Omega$ ；而制作了高反膜和增透膜的光导开关导通电阻仅为  $0.61\Omega$ 。该结果表明：高反膜和增透膜的制作增加了 GaAs 材料对 1064nm 激光的吸收效率，光生载流子浓度增大，而且较大的载流子浓度会屏蔽 GaAs 光导开关中的电离杂质散射、光学声子散射等散射机制，从而使得光导开关导通电阻的下降；此外，高反膜和增透膜还可以降低 GaAs 光导开关的表面态密度，降低开关表面的电场集中效应，提高光导开关的耐压水平。

GaAs 为直接带隙半导体材料，制作的半绝缘 GaAs 光导开关可以工作在线性和非线性两种模式。研究表明非线性模式只有达到偏置电场和触发光能量阈值之后才能被观察到。工作在非线性模式的 EL2 : GaAs 光导开关电场阈值约为  $3.6\sim4.5\text{kV}/\text{cm}$ ，触发光能量阈值为  $0.8\text{mJ}$ 。<sup>[7,8]</sup>

本文中 GaAs 光导开关触发光能量为  $5.4\text{mJ}$ ，工作电场也超过阈值，开关工作在非线性模式。

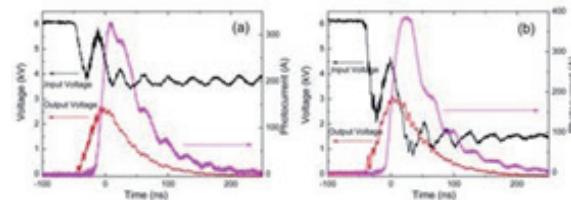


图 3 测试得到的没有制作 (a) 和制作了 (b) 高反膜和增透膜的光导开关输入电压、输出电压和负载光电流波形

为了增大单只光导开关电流，同时将光导开关中开关电流分散开，减弱电流丝对光导开关的损伤，设计了一种叉指状电极结构的光导开关，指状电极间距为  $2\text{mm}$ ，制作光导开关使用的 GaAs 材料同上述开关材料完全相同。图 4 为叉指状电极结构光导开关在输入电压  $2\text{kV}$  时测得的光导开关加载电压、输出电压以及负载电流波形图（开关工作在非线性模式）。由图 4 中数据计算可得开关导通电阻约为  $0.35\Omega$ 。

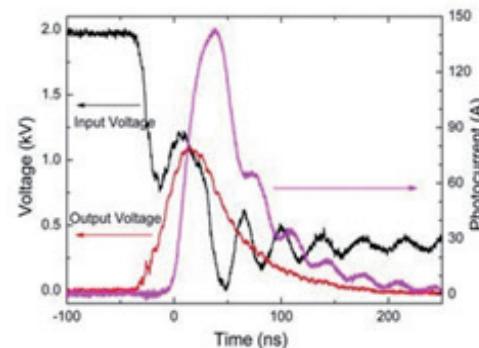


图 4 测试得到的叉指状电极结构的光导开关输入电压、输出电压和负载光电流波形

### 4 结论

本文设计了一种低欧姆接触的半绝缘 GaAs 光导开关，开关由  $0.6\text{mm}$  厚的半绝缘 GaAs 材料制作，电极间隙为  $10\text{mm}$ ，开关电极面制作高反膜，背面制作增透膜，使用波长  $1064\text{nm}$ 、能量  $5.4\text{mJ}$ 、触发激光脉宽  $25\text{ns}$  的激光脉冲触发光导开关，在直流电压  $6\text{kV}$  时，通过计算得到光导开关的导通电阻仅为  $0.61\Omega$ 。为了增大单只光导开关导通电流，设计了一种叉指状电极结构的光导开关，该开关

相当于多只光导开关并联，可以将光导开关电流分流，增大开关寿命，制作出了指状电极间隙 2mm、工作电压 2kV 时，导通电阻为  $0.35\Omega$  光导开关，该技术有待于进一步研究。

### 参考文献

- [1] Mazzola M. S., Schoenbach K. H., Lakdawala V. K., et al. GaAs photoconductive closing switches with high dark resistance and microsecond conductivity decay. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, 54(8): 742-744.
- [2] Zutavern F. J., Loubriel G. M., O' Malley M. W., et al. Photoconductive semiconductor switch experiments for pulsed power applications. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1990, 37(12): 2472-2477.
- [3] 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.
- [4] Loubriel G. M., O' Malley M. W., Zutavern F. J., Toward pulsed power uses for photoconductive semiconductor switches: Closing switches[C]//Proc of 6<sup>th</sup> IEEE IPPC. 1987: 145-148.
- [5] 施卫, 梁振宪. 高压超快 GaAs 光导开关的研制 [J]. 电子学报, 1998, 26(11): 104-106.
- [6] 牛燕雄, 谭吉春. GaAs 光电导开关的热击穿试验研究 [J]. 光电子·激光, 1994, 5(5): 305-307.
- [7] Rosen A., Zutavern F. J. High-power optically activated solid-state switches[M]. Boston: Artech House, 1994.
- [8] 袁建强, 刘宏伟, 刘金峰, 等. 50 kV 半绝缘 GaAs 光导开关 [J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(5): 783-786.

上接151页

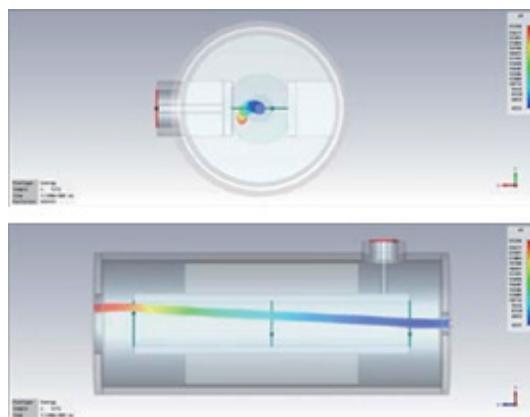


图 7 高频结构横向图与剖面图

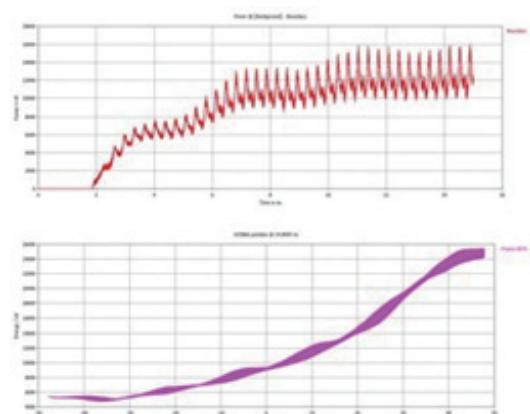


图 8 高频结构的输出功率与输出电压

波功率 10.5kW, 电子枪输出的电子注电流为 0.5Amps, 加速电压为 5.323kV 的条件下进行的。

如图 8 所示, 电子的出射功率为约为 12kW, 输出电压为 25kV, 微波注入同轴的功率为 10.5kW, 电子注的入射功率为 2.5kW。最后通过计算可算出高频系统的能量转换效率为 92%。

### 5 结论

本文运用 CST 仿真软件确定了回旋波整流器高频结构的各个参数, 分析了耦合环的参数变化对腔体反射系数的影响; 再利用 CST PIC 进行了粒子模拟, 设计出的高频系统在电子与场的同步运动时具有较高的能量转化效率。

### 参考文献

- [1] 王秩雄, 胡劲蕾, 梁俊. 无线输电技术的应用前景 [J]. 空军工程大学学报 (自然科学版), 2003, 4 (1): 82-85.
- [2] 刘盛纲. 相对论电子学. 科学出版社, 1987.
- [3] ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА СВЧ. ВЫП. 1985, (2):374.
- [4] 赵晓云, 李家胤, 孙志国, 回旋波整流器高频系统设计与粒子模拟研究 [J]. 微波学报, 2008 (4): 71-76.
- [5] 赵晓云. 基于回旋波谐振机制的特殊电真空器件研究 [D], 成都: 电子科技大学, 2011.