2013年12月 Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2013)06-0867-04

介质壁加速器用 GaAs 光导开关的通态电阻测量

谌 怡^{a,b},刘 毅^{a,b},王 卫^{a,b},夏连胜^{a,b},张 篁^{a,b},石金水^{a,b},章林文^{a,b}

(中国工程物理研究院 a.流体物理研究所; b.脉冲功率科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘 要: GaAs 光导开关可作为紧凑型脉冲功率系统的主要器件,如光导开关在介质壁加速器中的应用。为了研究通态电阻对开关性能的影响,采用平板传输线和同轴电缆作为脉冲形成线,测量了 3 mm 电极间隙的 GaAs 光导开关的通态电阻。测量结果表明:电极间隙为 3 mm 的 GaAs 光导开关的通态电阻为 14.9 Ω,光导开关通态电阻的存在将导致开关热损伤,降低脉冲功率系统的电压输出能力,缩短 GaAs 光导开关的使用寿命。

关键词: GaAs 光导开关;平板传输线;同轴电缆;通态电阻;热损伤
 中图分类号: TN78
 文献标识码: A
 doi: 10.11805/TKYDA201306.0867

Measurement of on-resistance of GaAs photoconductive semiconductor switch in Dielectric Wall Accelerator

SHEN Yi^{a,b}, LIU Yi^{a,b}, WANG Wei^{a,b}, XIA Lian-sheng^{a,b}, ZHANG Huang^{a,b}, SHI Jin-shui^{a,b}, ZHANG Lin-wen^{a,b} (a.Institute of Fluid Physics; b.Key Laboratory of Pulsed Power, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: GaAs Photoconductive Semiconductor Switch(PCSS) can be the main element in compact pulse power system, especially in Dielectric Wall Accelerator(DWA). The on-resistance of 3 mm gap GaAs PCSS is measured by using planar transmission line and coaxial-cable in order to study the effect of switch on-resistance on the switch performance. The results show that the measured on-resistance of GaAs switch is 14.9 Ω . The on-resistance of PCSS will cause the thermal damage to the switch, reduce the output capability of pulsed power system, and shorten the life time of GaAs PCSS as well.

Key words: GaAs Photoconductive Semiconductor Switch; planar transmission line; coaxial-cable; on-resistance; thermal damage

1972年, S. Jayaraman和 C. H. Lee 等人用 ps 量级的激光脉冲照射光电半导体材料时,观察到其响应时间也为 ps 量级,这一发现奠定了光导开关发展的实验基础^[1]。1975年 D. H. Auston 等人研制了 Si 光导开关^[2]。1977年, C. H. Lee 等人研制出可以在 1 GHz 重频下工作的 GaAs 光导开关^[3],结果表明 GaAs 比 Si 开关速度更快,效率更高,耐压更高。1983年,美国 Los Alamos 国家实验室用光导开关产生功率为 250 MW、脉宽为 100 ns 的电脉冲^[4]。1984年 Nunnally 等人利用 GaAs 光导开关产生电压达 100 kV,电流为 2 kA,输出功率为 80 MW 的超高功率电脉冲。至此,光导开关开始进入大功率应用领域,并倍受学术界关注,GaAs 也成为最受瞩目的光导开关材料。由于光导开关具有低抖动,快速响应,高重复频率以及较小尺寸和体积等优点,在光通信、冲击雷达、超宽带技术、THz 技术、紧凑型脉冲功率系统、超高速电子学和瞬态电磁波技术等领域都有广阔的应用前景^[5-7]。

介质壁加速器(DWA)是一种基于固态脉冲形成线技术、光导开关技术以及微堆绝缘技术^[8]、具有高加速梯度 场强的加速器。要设计具有紧凑型高加速梯度的加速器,需要设计结构紧凑、轻便的脉冲功率系统。因此,基于 光导开关技术的紧凑型固态脉冲功率是最佳选择。脉冲功率系统中,开关的导通特性包括开关电压、开关电流特 性,开关的电压-电流曲线决定了开关的通态电阻。从以上研究现状来看,对于光导开关的研究较少涉及光导开 关的通态电阻分析,光导开关主要朝着耐高压、通大电流方向发展,目前国内已经研制出偏置电压 50 kV,导通 电流 1.1 kA 的大间隙光导开关^[9],但是开关在导通时存在较大的开关内阻,影响开关的输出能力。介质壁加速器

收稿日期: 2013-01-29; 修回日期: 2013-03-11 基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(11035004); 中物院科学技术发展基金资助项目(2013A0402018), 核能技术开发项目 所用 Blumlein 脉冲形成线电路结构,在开关导通瞬间,若光导开关存在通态电阻,则必然存在通态电阻与传输 线特征阻抗分压的过程。当开关通态电阻与传输线特征阻抗相等时,Blumlein 脉冲形成线输出电压仅为充电电压 幅值 50%。因此,降低光导开关的通态电阻对于实用系统研制来说十分重要,不但可以提高脉冲功率系统的输出 性能,而且可以延长系统的使用寿命。因此,本文重点开展了 GaAs 光导开关的通态电阻测量及分析工作,通过 对导通特性的研究分析,测量出光导开关的通态电阻,分析了通态电阻的热损伤破坏效应。

1 实验原理与测量方法

实验使用的光导开关材料为 GaAs 半导体,其暗态电阻率大于 2×10⁸ Ω·cm,载流子迁移率大于 5 000 cm²/(V·s), 位错密度小于 1 000 cm⁻²,采用磁控溅射的方法在 GaAs 表面沉积 Ge 300 nm/Ni 100 nm/Au 2 500 nm 复合金属层, 构成光导开关的欧姆接触电极,开关结构为异面结构,实验用光导开关尺寸为 9 mm×7 mm×0.6 mm,开关电极间 隙为 3 mm。光导开关的通态电阻测量主要依靠平板线、同轴电缆与光导开关所组成的电路结构,电路原理图如 图 1 所示。图 1(a)中, *u* 为充电输入电压, *u*_o为输出电压, *Z*₁为传输线特征阻抗, *R*_L为单传输线等效电阻, *r*_s为 光导开关等效通态电阻。据此,当输出波形具有一定平顶,可忽略回路分布参数以及开关分布参数对通态电阻的 影响,根据输入输出电压以及回路参数可以计算单传输线结构中光导开关的通态电阻:

$$r_{\rm s} = \left(\frac{u}{u_{\rm o}} - 1\right) R_{\rm L} - Z_{\rm 1} \tag{1}$$

图 1(b)中, *u*_B是充电电压, *u*_{Bo}是输出电压, 传输线特征阻抗 *Z*₂=*Z*₃=*Z*, *R*_{BL}是 Blumlein 脉冲形成线的等效负载,则光导开关通态电阻可表示为:

$$r_{\rm B} = \left(\frac{2R_{\rm BL}u_{\rm B}}{(R_{\rm BL} + 2Z)u_{\rm Bo}} - 1\right)Z$$
(2)



2 实验结果及讨论

2.1 GaAs 光导开关的通态电阻

2.1.1 平板传输线实验结果

陶瓷平板的几何参数为 170 mm×15 mm×1 mm, 陶瓷表面所镀银电极参数为 150 mm×4 mm, 镀膜厚度约数十 微米。相对介电常数约为 22, 平板传输线阻抗约 $Z_1=Z_2=Z_3=Z=15.0 \Omega$, 电长度 2.6 ns, 平板单线等效负载 $R_L=20.0 \Omega$, 平板 Blumlein 线等效负载 $R_{BL}=35.0 \Omega$ 。图 2(a)是采用平板单传输线作为脉冲形成线在充电电压 u=10.4 kV 获得的 高压脉冲,输出电压幅值 $u_0=3.8$ kV。图 2(b)是采用平板 Blumlein 脉冲形成线在充电电压 $u_B=10.0$ kV 时输出的高 压脉冲,幅值 $u_{B0}=6.7$ kV, 当采用平板传输线作为脉冲形成线开展实验时,无论采用单平板传输线还是平板 Blumlein 脉冲形成线结构,获得的输出脉冲幅值均比理论值偏小,这是开关通态电阻分压的结果。根据式(1)、式(2)计算出 2 种结构的 3 mm 间隙 GaAs 光导开关的通态电阻分别为 $r_s=19.7 \Omega$, $r_B=9.1 \Omega$ 。

2 种结构光导开关的通态电阻相差 1 倍,分析认为有以下几个原因: a) 从输出波形上可以明显看到,高压脉冲没有平顶,输出脉冲因为不同回路分布参数而具有不同程度的过冲现象; b) 平板传输线的特征阻抗是按平板传输线的尺寸根据公式计算得到,传输线的实际阻抗值未知,而且不能采用仪器直接测量,同时在高频响应下, 传输线的阻抗可能具有较大的出入; c) 2 种结构通过的开关电流不等,流过开关的电流大小也可能影响开关通态 电阻值。以上原因均可能造成光导开关通态电阻的测量值与实际值相差较大。



Fig.2 Experimental results of planar transmission line(20 ns/div) 图 2 平板传输线实验结果

2.1.2 同轴电缆单传输线实验结果

在使用平板传输线作为脉冲形成线开展实验时,输出脉冲由于没能够观察到平顶,电路分布参数对输出波形的影响也不明确。利用电长度较短的平板传输线来测量 GaAs 光导开关的通态电阻将存在较大误差。因此,将平

板传输线更换成长度为 8 m, 阻抗为 Z₁=25 Ω(50 Ω 同轴电缆 并联)的电缆作为脉冲形成线(单线结构),则相应的电缆电长 度约为 44 ns,同轴电缆单线等效负载电阻 R_L=29.5 Ω。该方 法不但解决了因电长度较短引入的电压幅值读数问题,而且 同轴电缆的阻抗恒定,引入的误差也小。因此,该方法能够 准确测量 GaAs 光导开关的通态电阻。图 3 是电缆单线的实验 结果,充电电压 8.0 kV,输出脉冲平顶值 3.4 kV,脉冲半高 宽 88 ns。根据式(1)计算得到 3 mm 间隙 GaAs 光导开关的通 态电阻为 14.9 Ω。



2.2 通态电阻对开关的影响

Fig.3 Experimental results of long coaxial-cable(50 ns/div) 图 3 长同轴线实验结果

当加载到光导开关电极上的偏置电压过高时,实验中经常出现靠近电极附近的 GaAs 材料损伤破坏的现象, 严重的出现整个开关爆裂的情况。这是因为 GaAs 光导开关在本文实验条件下主要工作在非线性模式下,光导开 关在导通时有丝状电流流过,丝电流能够引起光导开关焦耳加热,导致开关热击穿或破坏^[10]。GaAs 光导开关非 线性模式导通时一般会形成直径为数十微米的电流丝,丝内存在严重的电流加热,丝内温度可迅速超过材料最高 允许使用温度和熔点,致使开关失效或热损伤破坏^[11-12]。

实验条件下, GaAs 光导开关为单次触发, 且光导开关导通时间约数十纳秒, 忽略光导开关的散热作用, 视为绝热过程, 则温度变化为:

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{m\chi} \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} \tag{3}$$

式中: χ是 GaAs 材料的比热; m 为有温升的 GaAs 材料的质量; dQ/dt 是焦耳热功率。

由于光导开关导通时间很短,忽略丝电流通过路径上的 GaAs 材料和邻近 GaAs 材料彼此之间的热交换,考虑成绝热过程,因此只有丝内材料才能获得焦耳加热,则电流丝内 GaAs 材料的温度升高可表示为:

$$\Delta T = \left[\left(\frac{u}{Z+r} \right)^2 r \Delta t \right] / (\pi r_c^2 L \rho \chi)$$
⁽⁴⁾

式中: *u* 是偏置电压(充电电压),对于单传输线 *Z*=*Z*₁+*R*_L,对于 Blumlein 脉冲形成线 *Z*=*Z*₃; *r* 是开关通态电阻; *r*_c是电流丝半径; *L* 是开关间隙; *ρ*是 GaAs 材料的密度。当电流丝内温升超过 GaAs 材料熔点时,开关即出现 热击穿破坏。对于大多数情况,GaAs 光导开关导通时仅出现单根丝电流导通,取电流丝半径 *r*_c=40 µm,当偏置 电压为 8 kV,根据计算结果,光导开关具有约 15 Ω 的通态电阻,当 Δ*t*=88 ns,*L*=3 mm,*ρ*=5.316 g/cm³,*χ*=0.36 J/(g·K) 时,开关导通过程中,有丝电流通过 GaAs 材料的温升为 690 K(约 417 ℃),而 GaAs 材料的熔点为 1 238 ℃,因 此,GaAs 光导开关不会出现热击穿破坏。而当偏置电压升高至 12 kV 时,丝电流引起的材料温升达到 1 550 K, 超过 GaAs 材料的熔点,光导开关热击穿破坏成必然趋势。因此,可以通过对 GaAs 光导开关通态电阻的测量来 估算开关正常稳定工作的临界偏置电压。当然,以上情况是针对 GaAs 开关通态电阻恒定来估算的,实际情况是 开关的通态电阻值随着偏置电压的升高有所减小,通态电阻越小,温升也就越低。通过此种方法估算出的工作电 压只会低于热击穿破坏的临界偏置电压。因此,在此电压下工作的 GaAs 光导开关将更安全稳定,且对于延长开 关使用寿命同样具有重要意义。

3 结论

本文采用光导开关与平板传输线和同轴电缆连接成单传输线和平板 Blumlein 脉冲形成线电路结构来测量光导开关的通态电阻,通过对比说明了其中一种方法可以准确测量光导开关的通态电阻——使用同轴电缆线准确测量光导开关的通态电阻。在直流 8.0 kV 偏置电压下,实验用 3 mm 电极间隙光导开关的通态电阻为 14.9 Ω。分析 了 GaAs 光导开关的热损伤机理。在脉冲功率领域,由于光导开关存在较大的通态电阻造成开关易热击穿,若需 开展大规模光导开关的应用还存在一定问题,因此在使用时不但需通过提高开关偏置电压和激光脉冲能量来降低 光导开关的通态电阻,还需要改善材料特性和电极制作工艺来降低开关电阻和提升光导开关的其他性能。

参考文献:

- Jayaraman S, Lee C H. Observation of two-photon conductivity in GaAs with nanosecond and picosecond light pulse[J]. Applied Physics Letters, 1972,20(10):392-395.
- [2] Auston D H. Picosecond optoelectronic switching and gating in silicon[J]. Applied Physics Letters, 1975,26(3):101-103.
- [3] Lee C H. Picosecond optoelectronic switching in GaAs[J]. Applied Physics Letters, 1977,30(2):84-86.
- [4] Nunnally W C. High-power microwave generation using optically activated semiconductor switches[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1990,37(12):2439-2448.
- [5] Zhao F,Islam M M. Optically activated SiC power transistors for pulsed-power application[J]. IEEE Electron Device Letters, 2010,31(10):1146-1148.
- [6] 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.)
- [7] 姜苹,谢卫平,李洪涛,等. 基于GaAs光导开关的纳秒脉冲源设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012,10(6):744-747.
 (JIANG Ping,XIE Weiping,LI Hongtao, et al. Design of nanosecond pulsed power source based on GaAs PCSS[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012,10(6):744-747.)
- [8] ZHU Jun,XIA Liansheng,CHEN Sifu,et al. Vacuum surface flashover studies of high gradient insulator under sub-microsecond pulse[J]. High power laser and particle beams, 2012,24(6):1449-1452.)
- [9] YUAN Jianqiang, LIU Hongwei, LIU Jinfeng, et al. 50 kV semi-insulating GaAs photoconductive semiconductor switch[J].
 High power laser and particle beams, 2009, 21(5):783-786.)
- [10] ZHANG Tongyi, SHI Shunxiang, GONG Renxi, et al. The rapid turn-on characteristics in nonlinear photoconductive semiconductor switches[J]. Acta optica sinica, 2002, 22(3):327-331.)
- [11] SHI Wei, TIAN Liqiang. Breakdown characteristics of semi-insulating GaAs photoconductive switch[J]. Chinese journal of semiconductors, 2004,25(6):691-696.)
- [12] ZHAO Yue,XIE Weiping,LI Hongtao, et al. Numerical simulation on factors affecting critical frequency of high-power photoconductive semiconductor switch[J]. High power laser and particle beams, 2010,21(11):2278-2282.)

作者简介:



谌 怡(1984-),男,四川省广安市人,硕 士,助理研究员,主要研究方向为脉冲功率技 术及电子束源研究.email:shenygo@163.com.

夏连胜(1970-),男,江苏省扬州市人,研究员,主要 从事脉冲功率技术及电子束源研究.

石金水(1964-),男,安徽省安庆市人,研究员,主要 从事直线感应加速器研究. **刘** 毅(1987-),男,成都市人,在读硕士研 究生,主要从事脉冲功率技术研究.

王 卫(1985-),男,重庆市人,在读硕士研 究生,主要从事脉冲功率技术研究.

张 篁(1981-),男,江苏省丹阳市人,助理 研究员,主要从事脉冲功率技术及电子束源研究.

章林文(1962-),男,福建省宁德市人,研究员,主要从事直线感应加速器、脉冲功率技术研究.