

文章编号: 1001-4322(2007)01-0174-03

高介电常数复合介质固态 Blumlein 线*

陈德彪, 刘承俊, 夏连胜, 戴光森, 张 篁, 程念安

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 以陶瓷聚合物复合介质作为储能介质, 砷化镓光导半导体开关作为开关, 设计了带状 Blumlein 线并对其进行了实验研究。实验结果表明, 复合介质 Blumlein 介电常数高达 80~250, 在 21 Ω 的匹配负载上获得电压幅值为 2 kV, 前沿小于 5 ns, 半高宽约 34 ns, 波动约 ±1% 的平顶宽为 22 ns 的电压脉冲, 能满足脉冲功率系统小型化的应用要求。

关键词: 固态 Blumlein 线; 复合介质; 光导半导体开关; 脉冲功率源

中图分类号: TL507 文献标识码: A

近年来, 随着脉冲功率源小型化的需求, 固态介质脉冲形成线的发展日益受到重视。为实现高加速梯度及紧凑化的新型的介质壁加速器(DWA), 正发展各种固态介质带状 Blumlein 线^[1-2]。发展固态介质脉冲形成线的关键是高性能的固态储能介质和开关。与液态储能介质相比, 固态储能介质如陶瓷和复合介质, 可实现更高的介电常数和体击穿场强, 即更高的储能密度^[2], 且介质损耗低, 电阻率高。可通过减小脉冲形成线的物理长度和体积, 简化相应的辅助设施, 从而实现脉冲功率源的小型化。国内已有陶瓷介质固态 Blumlein 线的研究报道^[3], 但由于实用大尺寸陶瓷的烧制和加工仍存在较大困难, 其应用发展受到限制。复合介质不仅克服了陶瓷难加工的缺点, 可浇铸成型, 方便加工, 还可做成薄膜, 而且电性能更优异^[4]。近年来, 复合介质的介电常数已提高到 100~250, 虽比陶瓷低, 但体击穿场强比陶瓷高, 且损耗和陶瓷一样小, 故储能密度更高。固态介质 Blumlein 线对开关的要求除电压和电流容量合适外, 还需闭合快, 抖动低, 低电感, 低电阻。光导半导体开关(PCSS)和激光触发气体开关可满足些要求, 还具有高重复频率触发工作的能力。本文利用正在研制的高介电常数复合介质和砷化镓光导半导体开关(GaAs-PCSS), 设计了带状 Blumlein 线, 并对其特性进行了实验研究。

1 Blumlein 线设计

Blumlein 线通常是同轴或带状结构, 由于带状结构介质均匀, 且是发展层叠带状 Blumlein 线的基础, 因此本文采用带状 Blumlein 线结构, 其结构示意图如图 1 所示。由于边缘效应的影响, 带状线特征阻抗 Z_0 与其带宽 W 、带间距 d 及其它介质特性等因素之间存在着复杂的函数关系。对于 $1 < W/d < 10$ 的带状线, 修正的近似计算公式为^[5-6]

$$Z_0 = \frac{377}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{d}{W + d} \quad (1)$$

式中: ϵ_r 为介质的相对介电常数。

带状 Blumlein 线的电长度 τ_0 可表示为

$$\tau_0 = \frac{\sqrt{\epsilon_r \mu_r} l}{c} \quad (2)$$

式中: l 为带状 Blumlein 线的长度; c 为真空中的光速; μ_r 为相对磁导率。

带状 Blumlein 线的特征阻抗 Z_B 和脉冲宽度 τ_B 分别为

$$Z_B = 2Z_0 \quad (3)$$

$$\tau_B = 2\tau_0 \quad (4)$$

由式(1)~(4)可见, 介质性能是带状 Blumlein 线特性的重要影响因素。测试结果表明, 设计采用的复合介质具有高介电常数($\epsilon_r = 80 \sim 250$, 可调)、低介质损耗(< 0.001)、良好的高频特性(频率响应上限达 1 GHz)、

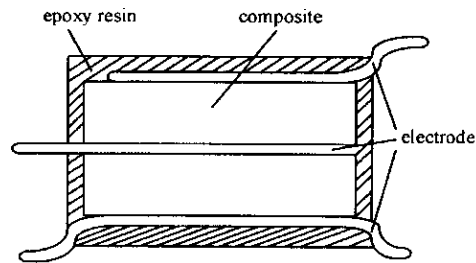


Fig. 1 Sketch of strip Blumlein
图 1 带状 Blumlein 线结构示意图

* 收稿日期: 2006-04-25; 修订日期: 2006-10-15
基金项目: 中国工程物理研究院基金资助课题(20060428)
作者简介: 陈德彪(1981—), 男, 硕士研究生, 从事脉冲功率技术研究; uestc99121@163.com。

高体击穿场强及高电阻率,相对磁导率 $\mu_r \approx 1$ 。

为进行比较研究,设计了 ϵ_r 分别为 95 和 225 的两种带状 Blumlein 线,几何参数均为: $W=8\text{ cm}$, $d=3\text{ cm}$, $l=50\text{ cm}$, 相应的特征阻抗 Z_B 和脉冲宽度 τ_B 的设计值分别为: 当 $\epsilon_r=95$ 时, $Z_B=21.1\ \Omega$, $\tau_B=32.5\text{ ns}$; 当 $\epsilon_r=225$ 时, $Z_B=13.7\ \Omega$, $\tau_B=50\text{ ns}$ 。

设计特征阻抗 Z_B 为 $10\sim 20\ \Omega$ 兼顾了光导半导体开关电流容量的限制,现能得到的 GaAs-PCSS 工作电压仅为 $1.5\sim 2.4\text{ kV}$,工作电流仅为 $200\sim 300\text{ A}$ 。实验研究中,若需提高工作电压时,只能用气体火花开关替换 GaAs 光导半导体开关。

耐压设计,特别是沿面耐压设计是固态带状 Blumlein 线设计的关键之一。为提高沿面耐压需要采取以下措施:介质宽度比铜电极板稍宽,沿面用一定厚度的环氧树脂进行无气泡封装;铜电极与介质间用导电胶粘接,保证无气泡良好接触;铜电极引出部分采用弧形设计,锐角边缘倒圆,避免局部场强过大。利用有限元分析软件 ANSYS 模拟计算了设计的场强分布,结果表明带状线浸没在变压器油中时具有直流 150 kV 的耐压。

2 实验分析

实验装置包括直流高压电源、隔离电阻 R_1 、GaAs 光导半导体开关、复合介质带状 Blumlein 线、负载 R_L 、分压器、示波器和触发开关用的激光器及附属设备,如图 2 所示。实验时,直流高压电源通过隔离电阻 R_1 使带状 Blumlein 线充电到预设电压,激光器输出激光脉冲触发 GaAs 光导半导体开关导通,实现带状线开关端短路放电,而后在输出端得到类矩形电压脉冲。实验中,选择负载电阻 $R_L=Z_B$,分压器采用两级分压,负载电阻和分压器的设计制作紧凑,以尽可能减小分布电感。

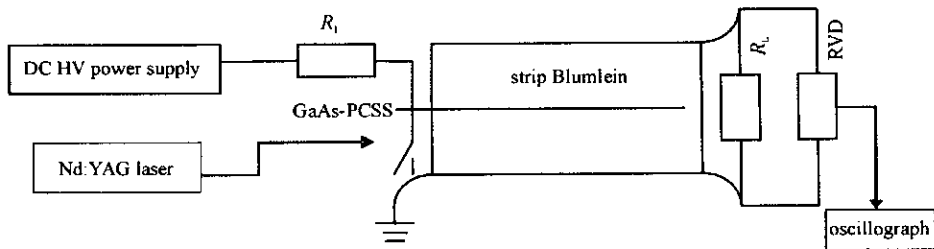


Fig. 2 Scheme of experimental device

图 2 实验装置示意图

实验测试了 ϵ_r 分别为 95 和 225 的两种带状 Blumlein 线的输出特性。图 3 为 $\epsilon_r=95$ 时分别采用 GaAs 光导半导体开关、V 型触发管和气体火花开关时,带状 Blumlein 线获得的脉冲电压波形。由图 3 可知,采用 GaAs 光导半导体开关时,电压为 2 kV ;前沿约为 4.9 ns ,由 GaAs 光导半导体开关回路电感决定;脉冲半高宽约 34 ns ,与设计值一致;波动约 $\pm 1\%$ 的平顶宽度为 22 ns 。开关为 V 型触发管和气体开关时,由于开关回路电感较大,因此波形的前沿比较大,以致平顶消失,但脉冲半高宽符合与带状线电长度 τ_0 和脉冲前沿 t_r 的数量关系,即脉冲半高宽约为 $(2\tau_0 + 0.45t_r)$,这说明介质的介电常数几乎未发生变化。

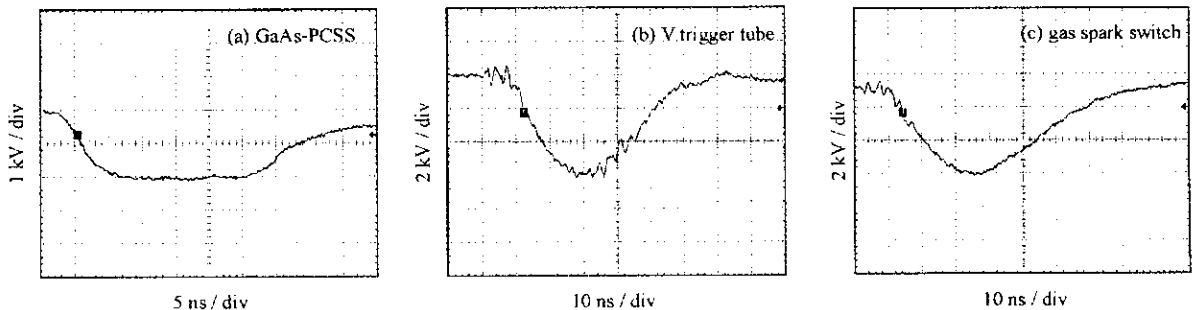


Fig. 3 Results of V trigger tube, gas spark switch and GaAs-PCSS

图 3 $\epsilon_r=95$ 带状 Blumlein 线不同开关的实验结果

图 4 为 $\epsilon_r=225$ 的带状 Blumlein 线获得的电压波形。图 4(a)为 GaAs 光导半导体开关的输出电压波形,电压约 2.4 kV ,前沿为 17 ns ,脉冲半高宽约为 58 ns ,脉冲平顶宽度大于 35 ns ,平顶波动稍大。由于此时带状线特性阻抗减小 35% 以上,光导半导体开关的工作电流超过额定值,实验中发现光导半导体开关接连被损坏处于不正常的临界工作状态,估计电压波形前沿变差与此有关。图 4(b),(c)为采用气体开关,充电电压分别

为 30 kV 和 55 kV 时的固态带状 Blumlein 线的输出电压波形,脉冲半高宽仍符合上述规律,因此虽然 Blumlein 线工作电压由 2.4 kV 升至 55 kV,内部场强增大了数十倍,介质的介电常数几乎未出现变化。

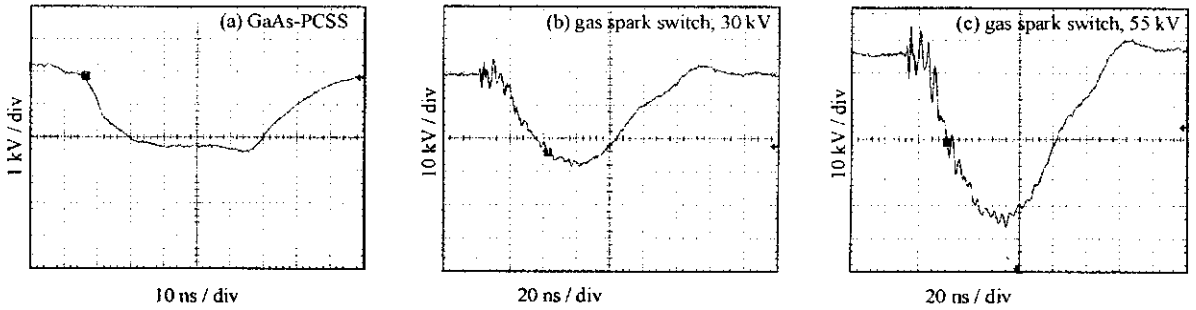


Fig. 4 Results between GaAs-PCSS and gas spark switch

图 4 $\epsilon_r=225$ 带状 Blumlein 线不同开关实验结果

为了检验带状 Blumlein 线的耐压设计,对其进行了直流高压耐压实验。结果表明,带状线在 150 kV 时出现闪络,稍低于数值模拟结果。实验后将带状线解剖发现,铜电极边缘沿介质侧面发生表面击穿,这说明耐压设计和制造工艺需进一步完善。

3 小 结

实验研究表明,本文设计的利用国产高介电常数复合介质和 GaAs 光导半导体开关构成的带状 Blumlein 线,在 2 kV 电压下获得了较为理想的电压波形。若有更高工作电压的光导半导体开关,可以产生数十 kV 的理想电压波形。这种带状 Blumlein 线还便于构成层叠带状 Blumlein 线,产生数百 kV 的理想电压波形,而且体积小,可直流充电。光导半导体开关的触发也可采用小巧的半导体激光器,整个功率系统十分紧凑。这种功率系统应用前景广阔。

参考文献:

- [1] Sampayan S, Caporaso G, Chen Y, et al. Development of a compact radiography accelerator using dielectric wall accelerator technology [C]//Proc of Particle Accelerator Conference. 2005.
- [2] Caporaso G J, Sampayan S, Rhodes M, et al. High gradient induction cells based on advanced insulators and dielectrics[C]//Workshop on Recent Progress in Induction Accelerators. 2006.
- [3] 夏连胜, 梁川, 石金水, 等. 固态 Blumlein 线初步研究[J]. 高电压技术, 2003, 29(2):44-45. (Xia L S, Liang C, Shi J S, et al. Primary research on solid Blumlein line. *High Voltage Engineering*, 2003, 29(2):44-45)
- [4] 顾宜. 材料科学与工程基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 226. (Gu Y. Material science and engineering basis. Beijing: Chemical Industry Press, 2001: 226.)
- [5] Adler R J. Pulse Power Formulary[M]. Albuquerque, NM: North Star Research Corporation, 1989.
- [6] 计策, 关永超, 曹文彬. 带状线参数和绝缘安全尺寸计算[C]//第三届高能电子学学术交流会会议文集. 2003. (Ji C, Guan Y C, Cao W B. Strip transmission line parameters and insulation safety computation//Proc of 3rd HEE Conference. 2003)

Solid state Blumlein line with high dielectric constant polymer-composite

CHEN De-biao, LIU Cheng-jun, XIA Lian-sheng, DAI Guang-sen, ZHANG Huang, CHENG Nian-an
(Institute of Fluid Physics, CAEP, P.O. Box 919-106, Mianyang 621900, China)

Abstract: The design of strip Blumlein line was presented with the polymer-composite as energy storage dielectric and GaAs-PCSS as circuit switch. The experiment results show that relative permittivity of the polymer-composite reaches 80~250, the permittivity and susceptibility of the dielectric do not change under different voltages. The risetime of voltage pulse of the strip Blumlein line is less than 5 ns, the flat top is about 22 ns with ripples of flat top about $\pm 1\%$. The designed Blumlein line can satisfy the needs of application.

Key words: Solid state Blumlein line; Polymer-composite; GaAs-PCSS; Pulse power source