

100 kJ 级多路强电脉冲发生装置的同步精度技术研究

耿玉民

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要: 本文介绍了“多路强电(磁)脉冲发生装置”同步精度研究采用的每路输出“储能电容+同轴脉冲大电流火花开关放电”型高压脉冲形成电路。用同轴电缆作为传输线将工作部件连接起来,以脉冲气体激光器作为终端负载(或其他负载,如磁脉冲线圈、电水锤等)组成多路相互隔离的强电脉冲充放电路,设计采用“多路高压纳秒脉冲发生器装置”进行同步精度触发,使高功率气体激光器的放电系统同时获得多路同步输出的高强电脉冲能量进行激励放电。同步精度装置的实验研究结果表明,多路同步导通强电脉冲能量已超出 100 kJ 级,多路触发脉冲同步精度 $<10\text{ ns}$,可为脉冲气体激光器提供更加超强激励触发能量获得高功率激光。

关键词: 强电(磁)脉冲;同步精度;火花开关;高压纳秒脉冲;气体激光器

中图分类号: TN248.2

文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI 20102712.0113

Research on the Technique of Synchronizing Precision for 100 kJ Order Heavy Electrical Pulsed Generator with Multi-channel

GENG Yu-min

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun 130033, China)

Abstract: The synchronizing precision of heavy electrical pulsed generator with multi-channel was studied in this paper, mainly about a high-voltage pulsed forming circuit with output of each channel adopting the accumulated energy capacitance and the spark switch discharge of coaxial pulsed large current. The coaxial cable was used as transmission line to link the working components and the pulsed gas laser as terminal load (or other loads such as magnetic impulse

solenoid and electrical water hammer etc.) to form the multi-channel isolated heavy electrical pulsed charging and discharging circuit. The multi-channel high voltage nanosecond pulsed generator was utilized for the trigger of synchronizing precision to make the discharge system of the high power gas laser obtain the multi-channel synchronizing output of the high and heavy electrical pulsed energy to exciting discharge. The experimental results showed that the multi-channel synchronizing ducting heavy electrical pulsed energy was more than 100 kJ and the multi-channel trigger pulsed synchronizing precision was less than 10 ns. The device could provide the heavier exciting trigger energy to the high power laser.

Keywords: heavy electrical (magnetic) pulse; synchronizing precision; spark switch; high voltage nanosecond pulse; gas lasers

1 引言

强电(磁)脉冲^[1]技术的研究和应用在国内外已相当广泛,20世纪60年代就已将该技术用于强磁脉冲^[2]加工,并有产品出售,70年代在军事上已得到应用,出现了10 kJ级的激光武器。目前,世界各工业和军事大国都致力于发展增加强电(磁)脉冲装置的容量技术的研究,向百千焦级以上更高的能量发展,在国内已有几所大学和研究所等单位在研究数十千焦级的强电(磁)脉冲装置,千焦级的激光脉冲装置也开始出现,并取得了一些成功技术。我们在强电(磁)脉冲技术的基础研究工作的实验中,解决了多项强电(磁)脉冲技术中的一些技术关键,为获得高功率激光及高脉冲能量激光器技术的发展研究积累了一定的经验和基础。

强“脉冲激光发射器”一般要求单脉冲能量超kJ以上,而典型的脉冲气体激光工作物质的转换效率^[3]是一定的(准分子激光 $\eta=1\%-4\%$,TEA CO₂激光 $\eta=10\%\sim 20\%$,氧碘激光的转换效率更高些),因而对注入的激励电脉冲能量要求很高。要达到10~100 kJ级甚至更高,同时对激励脉冲宽度还有苛刻要求,因此,强电(磁)脉冲同步精度技术的研究,成为一条获得高能量脉冲且攻克多项较难关键技术的路径,这也是高功率激光器研究的支撑技术。研究工作中一般多采用多级麦克斯发生器^[4]高压脉冲装置来

获得强电(磁)脉冲,因其输出电压较高,器件的电位也较高,工作输出阻抗也不易与激光器匹配。我们应用经多年基础研究的快放电技术的成功经验,模拟设计了数十路同步放电激励的强电(磁)脉冲装置系统,并选择将3路(每路50 kJ)强电(磁)脉冲装置具体地进行了同步触发工作的同步精度技术研究实验,该装置系统(图1)同步精度高,可实现对气体激光器介质腔同时同步放电,且放电电路输出的脉冲能量大,脉冲前沿陡,脉冲宽度窄,同时放电电路的输出阻抗低,便于直接与脉冲气体激光器匹配,并且器件的电位电压低,结构紧凑,相互隔离,可靠性强。这是获得高脉冲能量的高功率气体激光器的一种有效的放电激励手段,能详尽地获得“多路强电(磁)脉冲发生装置”的同步精度技术研究的关键数据参数,也是我们对高功率脉冲气体激光器进行发展研究的主题之一。

本文研究讨论的强电(磁)脉冲同步放电及同

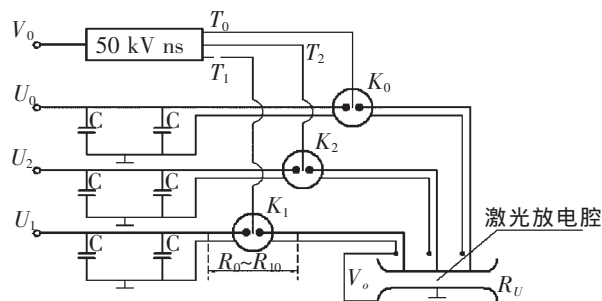


图1 多路强电(磁)脉冲发生装置电原理图

步精度技术,可广泛应用于强脉冲气体激光器^[5](如准分子、CO、CO₂、氧碘等激光器)、强等离子体箍束器件、强磁脉冲发生器、强电液脉冲及金属粉末(纳米级)的烧结成型加工等技术领域,也可应用于军事上的强激光武器、强电(磁)脉冲炮武器、飞机和航天器构件的加工和改性。在上述应用领域中,大多数强电脉冲和激光器装置对多路强电脉冲的同步精度要求很高,特别是准分子和TEA CO₂激光器。因此,为更能适应国防科技不同方面的应用,对多路强电(磁)脉冲技术及其同步精度做进一步系统的研究是非常必要的。

2 装置的关键器件

2.1 多路高压纳秒脉冲发生器

多路高压纳秒脉冲发生器^[6]是“多路强电(磁)脉冲发生装置”获得高同步精度的脉冲触发源,也是本文研究的装置中的关键器件。该高压纳秒脉冲发生器由20 kV DC 高压电源输入、控制信号系统、50 kV ns 多级麦克斯发生器(图2)系统、阻抗变换分配器、高压同轴传输线等部件构成。由多路高压纳秒脉冲发生器所输出的脉冲触发电压用同轴电缆与装置的“同轴脉冲大电流火花开关”相连接,发生器每路输出的脉冲触发技术参数,触发脉冲电压幅值为50 kV,触发脉冲电压上升速率为0.8~1 kV/ns,3路触发脉冲同步精度≤10 ns。

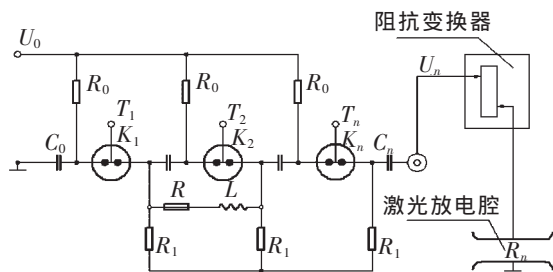


图2 多路纳秒发生器电原理图

2.2 同轴脉冲大电流火花开关

设计研究了一种双间隙的“同轴脉冲大电流火花开关”,也是本文研究的装置中的关键器件,该火花开关^[7]结构电感低,可导通脉冲电流超过5 kA,输出

脉冲波形前沿陡度在10 ns数量级,从而可保证装置的同步精度要求。为缩短每路火花开关的导通时间和降低开关的抖动,设计采用该“同轴脉冲大电流火花开关”的火花间隙为两个间隙,中间放电电极与触发电脉冲接头相连,上下放电电极分别连接储能电容的同轴电缆接头和高功率脉冲气体激光器(或其他负载)的同轴电缆接头,所有放电电极用绝缘物隔离置于接地的屏蔽壳内,来确保3路“同轴脉冲大电流火花开关”支撑器件同步工作。火花开关每路输出的技术参数,导通工作电压为50~60 kV可调,导通工作脉冲能量为10~20 kJ。

3 同步运行阻抗匹配补偿和同步精度

如图3所示,火花开关 K_1 和 K_2 为并联,输入电源电压为 U_0 ,火花开关 K_1 和 K_2 两端的电位分别为 U_{A1} 、 U_{B1} 、 U_{A2} 、 U_{B2} ,同轴电缆传输线的特性阻抗为 Z_1 和 Z_2 ,长度为 L ,负载为 R_0 ,当 K_1 和 K_2 未导通时,有 $U_{A1}=U_{A2}=0$ 、 $U_{B1}=U_{B2}=0$ 。

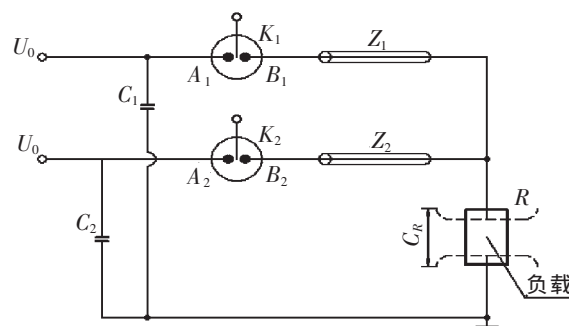


图3 两个火花开关并联工作电原理图

当从“多路高压纳秒脉冲发生器”产生的高压纳秒触发脉冲传输至 K_1 和 K_2 时,由于该触发脉冲尚具有一定精度范围(可保证在10 ns以内),因而到达 K_1 和 K_2 时会产生延迟时间 Δt_1 ,由于 K_1 和 K_2 在加工和组装过程中其电极形状及间隙等参数会有一定的差异,使 K_1 和 K_2 的击穿导通产生延迟时间 Δt_2 ,因此, $\Delta t_1+\Delta t_2$ 就是 K_1 和 K_2 的导通放电延迟时间^[8]。

假设 K_1 先导通时,有 $U_{A1}=U_{B1}=U_R$,当电压经 Z_1 和 Z_2 传输到 B_2 点时,使 B_2 的电位上升,使 K_2 间隙的两端电压下降,当此电压下降到一定范围时,

即使 K_2 得到触发脉冲也不会触发导通, 最后只有 C_1 对负载放电, 而 C_2 却不能对负载产生放电。

实验中采用定长的同轴电缆传输线可以解决 K_1 和 K_2 的同步导通放电问题。设 K_2 的导通放电起始时间为 t_2 , 电压波在同轴电缆传输线中的传输速度为 v , 而 v 在聚乙烯介质同轴传输线中的传播速度约为 $v = \frac{c}{\epsilon_r} \approx 20 \text{ cm/ns}$, 电磁波从 B_1 传输到 B_2 的时间 $\tau = \frac{2l}{v}$ (l 为同轴电缆传输线长度, 单位为 cm)。只要 $\tau > t_2$, 在触发脉冲的上升陡度满足的条件下, 设计的同轴传输线选择一定长度的 l 值, 使 K_1 导通放电产生的电压波到达 B_2 点之前, K_2 就已击穿导通, 满足了火花开关 K_1 和 K_2 同步精度工作运行要求。

3.1 负载为纯电阻时对火花开关同步导通运行的影响

在假设负载为纯电阻的情况下将图3简化成图4的(a)(b)(c)。 U_0 为电源电压, U_r 入射电压波, U_z 折射电压波, U_f 反射电压波。 I_r 为入射电阻引起的电流波, I_f 为反射电阻引起的电流波, I_z 为折射电阻引起的电流波, I_0 为负载电阻引起的电流波。 Z_z 为折射电缆波阻抗, Z_r 为入射电缆波阻抗, 本文的分析讨论点在 A 处。

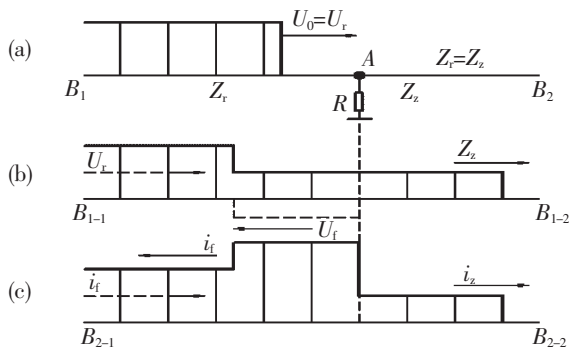


图4 负载为电阻情况下的电压、电流随时间变化状态

当火花开关 K_1 导通后, 由文献 [9] 可知, 当 $Z_z = Z_r$ 时, 折射电压为:

$$U_z = \frac{2R}{2R + Z_z} U_r \quad (1)$$

如果负载电阻比较小, 从 B_1 点折射到 B_2 点的折射电压也将很小。当负载为脉冲气体激光器时, R 的阻

抗 $< 10 \Omega$ 。负载为电水锤时, 可通过调整水溶液的离子浓度来减小阻抗 R 值, 这样即可完全满足 K_1 和 K_2 的同步导通放电的精度要求。

3.2 负载为并联电容器时对火花开关同步导通运行的影响

在假设负载为并联电容的情况下将图3简化成图5的(a)(b)(c)。假设以负载为并联电容形式可以减小折射电压, 由文献 [9] 可知, 当 $Z_z = Z_r$ 时, 折射电压为:

$$U_z = [1 - e^{-\frac{2}{Z_z C} t}] \quad (2)$$

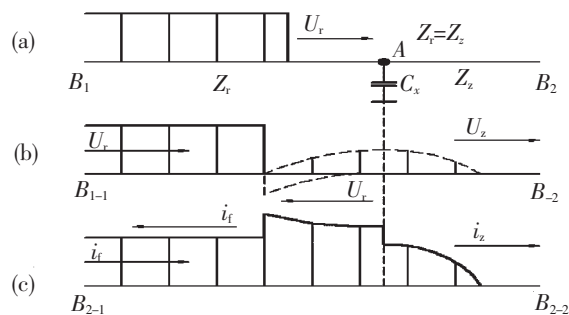


图5 负载为并联电容时的电压、电流随时间变化状态

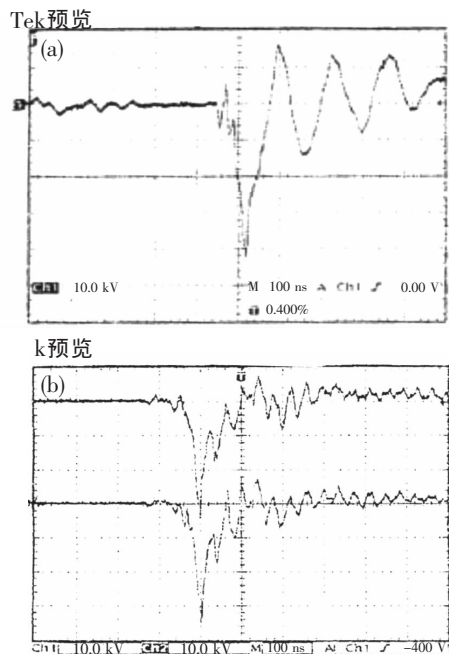


图6 多路强电脉冲输出波形图:(a)单路脉冲波形;(b)两路脉冲波形。

火花开关 K_2 两端电压降到 50%的时间 t 按分析讨论式 (2) 的情况计算, 有:

$$\frac{U_z}{U_r}=0.5=[1-e^{-\frac{2}{Z_c}t}], e^{-\frac{2}{Z_c}t}=0.5, t=C_z Z_p \ln 2=0.347 C_z Z_p \quad (3)$$

如选用特制波阻抗为 25Ω 的同轴电缆, 并要求火花开关 K_2 的电压下降到 50%的时间 $t=30 \text{ ns}$, 需并联电容器为:

$$C_z=\frac{t}{0.347Z}=3 \times 10^3 \text{ PF} \quad (4)$$

从上述分析讨论可知, 为了减小由于 K_1 先导通放电而折射到 K_2 的电压, 可以采取减小负载电阻 R 、或采用电容器与负载并联运行的模式措施, 确保 K_1 和 K_2 的同步导通放电 (图 6) 的精度要求。

3.3 火花开关同步精度措施

本文论述的“多路强电 (磁) 脉冲发生装置”设计采用 3 路能独立输出的“储能电容+同轴脉冲大电流火花开关放电”型高压脉冲形成电路并联连接脉冲气体激光器的放电电极 (负载), 采用高同步精度、高幅值、高陡度、窄脉宽的纳秒脉冲来同步触发多个“同轴脉冲大电流火花开关”, 如果要将每路的脉冲能量同时注入负载 (激光器), 首先就必须将并联的 3 个“同轴脉冲大电流火花开关”同时触发导通。实验中用“多路高压纳秒脉冲发生器”分 3 路独立输出, 提供一个陡度达 1 kV/ns 、每路脉冲电压幅值达 50 kV 的脉冲进行短间隙的过压触发, 这样不仅大大降低了火花开关导通时间的分散性, 而且使火花开关在触发过程中压缩“抖动”, 使脉冲触发过程控制在 50 ns 以内, 保证了 3 个火花开关导通时间的一致性。为确保每一火花开关放电间隙两

端电位差的一致性。选用了定长的同轴电缆传输线。实验中在每个火花开关的放电室中充以等压的氮气, 可以缩短火花放电间隙的长度, 使火花开关进一步压缩了导通时间和“抖动”, 为多路脉冲大电流发生装置的并联同步精度运行奠定了工作基础。

4 讨 论

本文分析和讨论了“多路强电 (磁) 脉冲发生装置”同步精度研究设计的实验研究结果与实际应用问题, 并通过实际的导通放电过程验证了分析结果的适用性和正确性。主要的结论可以总结成如下 5 点: (1) 要获得 10 万焦耳的强电脉冲, 可以用麦克斯发生器串接纳秒高电压, 该技术起始电压高, 运行安全系数高, 输出阻抗低但需另设阻抗匹配装置。而采用多路火花开关、脉冲电容组成的并联运行的强电脉冲发生器, 输出电压一定, 输出阻抗低能直接与低阻抗的激光器匹配。(2) 并联输出电脉冲能量叠加, 而电脉冲宽度、脉冲前沿陡度 (dv/dt) 不因电脉冲发生装置路数增加、总储能增加而变化, 非常有利于脉冲气体激光器的激发。(3) 多路同步输出负载阻抗低, 易于与激光器、磁脉冲线圈和等离子箍束器件等匹配, 电传输反射少, 电路效率高。(4) 每路电器元件是独立的并相互隔离, 一旦发生击穿不会引起“聚流”而发生“爆炸”。(5) 低阻抗同轴电缆传输线接头都是特殊加工的, 具有传输反射小、导通能量大、脉冲前沿陡、放电抖动小和运行寿命长的特点, 其经济性、安全性和多用途性与其他电路相比都具有一定的优势。

参考文献

- [1] (苏) 米夏兹 (Г.А.Месяч). 大功率毫微秒脉冲的产生[M]. 北京: 原子能出版社, 1982: 15-17.
- [2] 巴比洛夫. 电加工手册[M]. 谷式溪, 梁春宜, 译. 北京: 机械工业出版社, 1989: 72-73.
- [3] 雷仕湛. 激光技术手册[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 841-843.
- [4] R.A. 米夏兹. 高压毫微秒脉冲的形成[M]. 北京: 原子能出版社, 1975: 237-239.
- [5] 楼祺洪. 脉冲放电气体激光器[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 169-171.
- [6] 申家镜. 多路输出高压纳秒发生器: 中国, ZL9421342.3.0[P]. 1995-01-08.

[7] 申家镜. 同轴脉冲大电流火花开关: 中国, ZL94213422.2[P]. 1995-03-08.

[8] 胡志强. 气体电子学[M]. 北京: 电子工业出版社, 1985: 318-319.

作者简介: 耿玉民(1954-), 男, 汉族, 黑龙江牡丹江人, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事气体激光技术方面的研究。

E-Mail: ccgjs8188@yahoo.cn

《中国光学与应用光学》征稿启示

《中国光学与应用光学》, 双月刊, A4开本; 刊号: ISSN 1674-2915 /CN22-1389/O4; 国内外公开发行人; 邮发代号: 国内12-140, 国外BM6782。

★中国科技核心期刊

★中国光学学会光电技术专业委员会会刊

★中国学术期刊(光盘版)源期刊

报道内容: 基础光学、发光理论与发光技术、光谱学与光谱技术、激光与激光技术、集成光学与器件、纤维光学与器件、光通信、薄膜光学与技术、光电子技术与器件、信息光学、新型光学材料、光学工艺、现代光学仪器与光学测试、光学在其他领域的应用等。

发稿类型: 学术价值显著、实验数据完整的原创性论文; 研究前景广阔, 具有实用、推广价值的技术报告; 有创新意识, 能够反映当前先进水平的阶段性研究简报; 对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告; 以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

特别关注: 本刊目前已和美国光学学会(OSA)达成合作意向, 将于近期与其合作办刊。因此, 本刊将优先发表用英文撰写的内容新颖、可读性强的学术论文。

欢迎投稿、荐稿, 洽谈合作。

主管单位: 中国科学院

主办单位: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

编辑出版: 《中国光学与应用光学》编辑部

投稿网址: <http://chineseoptics.net.cn>

邮件地址: chineseoptics@ciomp.ac.cn

gxxygx2007@126.com

联系电话: 0431-86176852; 0431-84627061

传 真: 0431-84613409

编辑部地址: 长春市东南湖大路3888号(130033)