

文章编号: 1001-3806(2005)06-0582-03

B lum lein快放电电路传输线电容和储能电容的研制

吴 辉¹, 吴建强¹, 于俊华²

(1 哈尔滨工业大学 电气工程系, 哈尔滨 150001; 2 哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘要: 为减小 B lum lein 电路中的寄生电阻与电感, 自行设计了传输线电容与储能电容, 以平行平板电容器结构代替了原来的无感电容与传输线电容的结构, 使得电路中寄生电感下降 1 倍以上, 电路性能得到很大改进, 满足了 S₂ 激光器产生辉光放电的要求。

关键词: 传输线电容; 储能电容; 无感设计; 快放电电路

中图分类号: TN 78 文献标识码: A

Development of transmission line capacitor and stored capacitor in B lum lein fast discharge circuit

WU Hui¹, WU Jian-qiang¹, YU Jun-hua²

(1. Department of Electric Engineering Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract In order to reduce the parasitic inductance and resistance of B lum lein circuit the transmission line capacitor and stored capacitor are designed and manufactured by ourselves which are substituted by the plate capacitors instead of the old non-inductance capacitor and transmission line. The parasitic inductance of B lum lein circuit decreases once the pulsed fast discharge power supply works steadily it is important for diatomic sulfur laser.

Key words transmission line capacitor; stored capacitor; non-inductance design; fast discharge circuit

引 言

在气体激光器快放电电路中, B lum lein 电路以其效率高, 电压脉冲上升快被广泛采用。经过理论分析计算, 减小放电回路的电感和电阻, 对提高电路的放电性能至关重要。在 B lum lein 电路中, 传输线电容与储能电容是以无感电容并联或串联组成, 但实际上无感电容并非真的无感, 仍有寄生电感存在, 尽管这些无感电容的寄生电感很小, 但许多的电容并联或串联使用, 其连接线间及连接线与电容间的焊点所引入的寄生电感与电阻将是不容忽略的; 由于脉冲形成线回路需要单独的传输线以连接火花隙与激光管, 回路中流过数千安培的放电电流, 传输线寄生电感无论是对脉冲形成线回路还是对主放电回路的影响都是不容忽视的。因此, 如能有效地减小传输线寄生电感, 则电路寄生电感将大大减小^[1, 2]。

为有效地解决上述问题, 作者设计了传输线电容

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60278009)

作者简介: 吴 辉 (1965-), 男, 副教授, 研究方向为自动控制及电力电子技术。

E-mail: hitwuhu@hit.edu.cn

收稿日期: 2004-07-09; 收到修改稿日期: 2004-10-10

与储能电容, 使传输线电容与储能电容的取值与要求值相等, 这样就可避免并联电容器间连接线引入的寄生参数; 另外, 如能使传输线电容与传输线合二为一, 使传输线电容同时具备电容与导线的功能, 就可以省掉传输线, 只需采取适当措施减小传输线电容的寄生电感, 则电路的寄生电感就可大为减小。因此, 在设计传输线电容和储能电容时, 需做如下的考虑: (1) 为满足电路对激光管放电流峰值、脉宽、上升率的要求, 提高放电电路输出电压峰值, 必须尽量减小传输线电容器与储能电容器中的寄生电感; (2) 作为放电电源中的电容器, 有很大的瞬时放电电流, 为了得到尽可能高的能量转换效率, 要尽可能减小电容器中的寄生电阻; (3) 电容器工作环境温度较高, 通常达到 230℃左右; 同时由于火花隙导通前, 电容器的充电电压越高, 对产生激光越有利, 因而在条件允许的情况下, 应尽量提高电容器的充电电压, 这就要求必须选择能耐高温、高电压的材料作为电容器的介质材料; (4) 传输线电容必须同时具备电容与导线双重功能, 以省去传输线, 减小放电电路寄生电感, 提高电路性能。

1 电容器的设计

将传输线电容制成平行平板电容器, 以电容器极

板作为传输线。火花隙开关安装在传输线电容器两极板之间,综合考虑电容器极板的面积与厚度、介质厚度、电容器取值之间的关系,使其能有效地完成电容器与传输线的双重功能。

1.1 减小电容器寄生电感

由于电流流经导体时将在导体周围产生磁通并形成磁场,磁通量的大小和方向取决于通过该导体的电流大小和方向。因此,磁通量和电流之间有一比例关系,即存在电感性。同样对电容器来说,因为它有金属导体。当变化的电流流经电容器的引出线、极板、金属外壳等导体部分时都会产生电感。其电感的大小取决于通过电流导体的几何尺寸和导体的磁导率,而与通过导体的电流大小无关。因此,为减小电容器的寄生电感,在制作电容器时必须做到以下几点:

(1) 电容器的载流部分尽可能配置得使其磁场相互抵消。为此,应使电流方向相反的导体相互靠近,电流方向相同的导体相互远离。在电容器中,如果能使流经上下极板的电流方向相反,同时又假定电流在电容器极板上的分布是均匀的,则从理论上讲,这种情况对外呈现最小的电感。如图 1a 所示,电容的一对引出

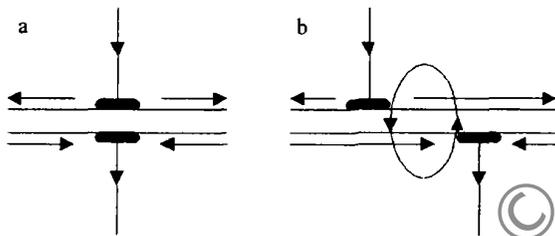


Fig 1 Influence of the place of catalyst on inductance capacitor
a—catalyst coincide b—catalyst not coincide

片放置在极板的正中重合位置,则此时上、下极板的电流方向相反,而介质又很薄(两载流导体很靠近,磁场相互抵消),可以认为这时的电容器寄生电感为 0。如果电容器引出片错开一定距离,如图 1b 所示,则两引出片之间的那一部分极板电流方向相同,形成磁场,电容器寄生电感增大。因此,在安装 LS 开关、激光放电管、充电电感时,必须首先使它们与电容器间连线位置重合放置,即使不能重合放置,也应使连线间错开的距离尽量小。以保证上下极板电流反向,减小寄生电感。

(2) 电容器金属部分不能用磁性材料,而应选用非磁性材料。作者选用紫铜箔。紫铜是一种非磁性材料;其次紫铜的电气性能非常好,紫铜的导电性能仅比银稍差,耐腐蚀,塑性加工性能好,便于进行各种冷、热方式加工。用其作电容器极板材料可以大大降低电容器寄生电阻^[3]。

(3) 尽量缩短载流导体的长度,对导体的形状与结构应特殊考虑。对引出片重合放置的情况(上下极板电流完全反向),矩形平板电容器的寄生电感可按

两矩形截面导体间的电感公式进行计算,即:

$$L = \frac{4\pi l}{3} \left[\frac{2d_c + 3d}{b} \right] \quad (1)$$

式中, l 为电容器极板的长度, b 为电容器极板的宽度, d 为电容器介质层的厚度, d_c 为电容器极板厚度,以上参数单位均为 cm , L 单位为 nH 。显然,极板越宽,长度越短,电容器寄生电感量越小。故采用增大电容器极板宽度、减小极板长度、使上下极板电流反向、用紫铜箔作为电容器极板的方式来减小电容器寄生电感。

1.2 减小电容器寄生电阻

电容器寄生电阻主要是由极板的有效电阻 r_{eff} 引起的,而极板电阻可按下式计算:

$$r_{\text{eff}} = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{l}{b \times d_c} \quad (2)$$

式中, ρ 为电容器极板材料的电阻率, S 为电容器极板的面积。显然, d_c , b 越大, l 越小, r_{eff} 越小。作者选 0.05 cm 的紫铜箔作为电容器的极板。

1.3 电容器介质材料的选择

有机合成薄膜电容器具有电容量变化范围大、工作电压高、绝缘电阻高、工作温度范围大(最高可达 $200^\circ\text{C} \sim 260^\circ\text{C}$, 满足对电容器提出的工作温度要求)、 $\tan \delta$ 值小的特点,作者选用聚酰亚胺作为传输线电容器与储能电容器的介质材料。介质薄膜厚度为 $50 \mu\text{m}$, 300°C 时抗电强度为 240 kV/mm ,聚酰亚胺薄膜与电容器极板之间采用高温胶粘合,可在 300°C 条件下保持良好的粘接效果。因粘接剂的引入,经实测,电容器介质的厚度变为 0.1 mm , 300°C 时的介电常数变为 2.1 。

1.4 电容器实际尺寸与参数的计算

(1) 电容器极板的面积 S_c 。由下式可求传输线电容器与储能电容器极板面积:

$$S = \frac{3.6\pi dC}{\epsilon} = b \times l \quad (3)$$

式中, C 的单位为 pF ; d , b , l 的单位为 cm ; S 的单位为 cm^2 。对传输线电容有: $S_1 = 3.6 \times 3.14 \times 0.01 \times 3.5 \times 1000 / 2.1 = 188.4 \text{ cm}^2$; 对储能电容器有: $S_2 = 3.6 \times 3.14 \times 0.01 \times 9.0 \times 1000 / 2.1 = 484.5 \text{ cm}^2$ 。

由于安装 LS 低感开关需在传输线电容器极板上开一个直径 8.4 cm 的孔,因而传输线电容器极板实际需要面积为: $S_1 = 188.4 + 3.14 \times 4.2^2 = 243.8 \text{ cm}^2$ 。

(2) 储能电容器极板的宽度 b_3 取 30 cm 等于激光放电管的长度。储能电容器极板的长度为: $l_3 = S_2 / b_3 = 484.5 / 30 = 16.2 \text{ cm}$ 。

(3) 对传输线电容器若制成矩形,则 LS 低感开关无法安装(长度小于 8.4 cm),同时为更好地保证激光管横向放电的要求,将传输线电容器制成梯形。其下底 $b_{21} = 30 \text{ cm}$,等于激光放电管长度;上底 $b_{22} = 11 \text{ cm}$;

高 $l_2 = 12\text{cm}$ 。

(4) 电容器留边量的选取。在瞬时过电压下, 电容器不仅可能通过介质内部发生击穿, 当电容器边缘电场显著不均匀时, 还有可能沿极板边缘发生击穿。当极板边缘处的媒质是干燥的空气且电场接近均匀时, 极板边缘处的表面放电电压接近于相等距离的空气隙的击穿电压; 由于本电容器的工作电压达上万伏, 为防止表面击穿现象的发生, 必须使电容器的介质比电容器极板长 a , 则电容器的表面放电路径 $\Delta l = 2a + d$ 。取 $a = 1\text{cm}$, 则 $\Delta l \approx 2\text{cm}$ 。

(5) 电容器的寄生电阻。由 (2) 式可得传输线电容器与储能电容器的寄生电阻。

对传输线电容器有 $r_{eT2} = 1.75 \times 10^{-6} \times \frac{12}{20 \times 0.005} = 2.1 \times 10^{-4} \Omega$, 在这里, 传输线电容器的宽度为平均宽度。

对储能电容器有 $r_{eE3} = 1.75 \times 10^{-6} \times \frac{16.2}{30 \times 0.005} = 1.9 \times 10^{-4} \Omega$ 。由以上计算可见, 两电容器的寄生电阻很小, 可以忽略不计。

(6) 电容器的寄生电感。若电容器两极板电流反向, 则由 (1) 式可求两电容器寄生电感。

对传输线电容器有 $L_2 = \frac{4 \times 3 \cdot 14 \times 12}{3} \times \left[\frac{2 \times 0.005 + 3 \times 0.01}{20} \right] = 0.1\text{nH}$, 对储能电容器有 $L_3 = \frac{4 \times 3 \cdot 14 \times 16.2}{3} \times \left[\frac{2 \times 0.005 + 3 \times 0.01}{30} \right] = 0.09\text{nH}$ 。可见在两电容器极板电流反向的情况下, 电容器寄生电感很小, 可以忽略不计。

2 电容器间连接线的的设计

经过理论分析, 在长度 l 和截面积 S 相同的情况下, 采用矩形截面导线比圆形截面导线的寄生电感小。对于矩形截面导线其电感计算公式如下:

$$L = 2 \left[\ln \frac{2l}{b+d_c} + 0.223 \frac{b+d_c}{l} + 0.5 \right] \quad (4)$$

由 (4) 式可见, 对于矩形截面导线, 当导线截面积一定的情况下, 导线宽度 b 与厚度 d_c 相等时寄生电感最大, 而当 b 与 d_c 相差越大电感越小, 所以, 这种导线应采用宽而薄的扁平结构。由于两电容器均为矩形, 利用电容器本身形状特点, 无需焊接, 使电容器两极板与连接线公用一块铜箔。图 2 分别为传输线电容器、储能电容器、电容器间连接线的正、反、侧面图。这样既减小了连接线自身电感、消除了焊接点引入的寄生电感与电容, 又保证了数千安培放电电流的均匀有效传输。连接线长度 l 取 10cm , 宽度与电容器极板相同为 30cm , 厚度为 0.05cm 。根据 (4) 式计算连接线的寄生

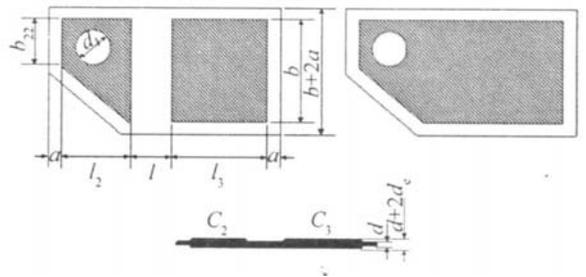


Fig 2 Structure of the two capacitors and the tie between them

电感: $L_l = 2 \times 10 \times \left[\ln \frac{2 \times 10}{30} + 0.223 \frac{30}{10} + 0.5 \right] = 15.3\text{nH}$ 。

3 电路的安装及性能校验

电路的安装如图 3 所示, 其中不包括 LIS 电感开

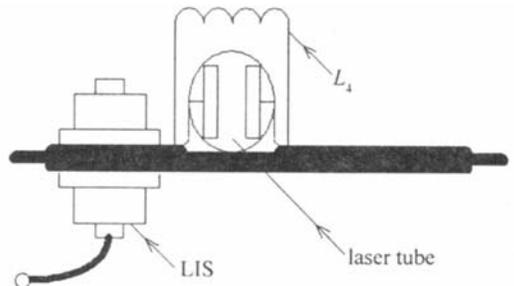


Fig 3 Structure of the circuit

关的触发电路与高压产生电路。电路中充电电感 L_4 实际制作时无需特殊加工, 满足电感值的要求即可, 在这里 L_4 按 1mH 绕制, 这样就可以分别求得放电回路和脉冲形成线回路的总电感值^[4]。对脉冲形成线回路有: $L = L_{LIS} + L_{C_2} = 14 + 0.1 = 14.1\text{nH}$ 。对主放电回路有: $L = L_1 + L_S + L_{C_2} + L_{C_3} = 15.3 + 11.7 + 0.1 + 0.09 = 27.2\text{nH}$ 。可见无论放电回路还是脉冲形成线回路寄生电感均下降了一半以上, 这将大大有利于减小放电脉冲波形的上升时间, 同时减小放电脉冲的脉宽。对于回路寄生电阻, 由于回路中除了 LIS 低感开关与激光管外基本实现了无焊点连接, 而两电容器与电容器间连接线的寄生电阻都只有 $10^{-4} \Omega$ 左右, 与激光放电管的通态电阻相比微乎其微, 对放电几乎不会产生影响。

通过对该电路的实验研究, 当充气火花隙间隙 2mm , 1 个大气压、充电电压 8kV 时, 激光管内气体击穿电压 12kV , 电压脉冲上升沿 6.74ns , 电流脉冲上升沿 6.74ns 。提高充电电压到 9kV 时, 激光管两端电压峰值上升至 13kV , 这是由于充电电压的提高, 导致放电时电压波形上升沿陡峭, 达到 5.08ns , 致使激光管在更高的电压击穿。图 4a 和图 4b 分别为充电电压 9kV 时激光管的电压波形和电流波形。同时在激光管内实现了宽带放电, 这证明电路寄生电感与电阻都很小, 对电路结构的设计及传输线电容器和储能电容器的制作是成功的。 (下转第 588 页)

影响: 克尔效应使聚焦光束的远场峰值降低; 当光束的菲涅耳数较大时, 斯特列尔比下降得较为缓慢, 因此, 可以通过增大它来克服克尔效应对光束远场的峰值光强的影响。

3 结论

在对非线性折射的物理特性分析的基础上, 将自聚焦和自散焦效应统一起来进行考虑, 在满足薄介质模型的条件, 使用 P/B , β 参数和斯特列尔比等方法, 将克尔效应对光束聚焦的焦移、光束质量和光束远场分布的影响进行了较为详尽的分析和讨论, 指出可以通过增大光束的菲涅耳数来降低克尔效应对超高斯光束聚焦特性的影响, 以改善光束的聚焦特性。

参考文献

[1] SMMONS W W, HUNT J T, WARREN W E. Light propagation through large laser systems [J]. IEEE J Q E, 1981, 17(9): 1727~1744
 [2] 王道, 景峰, 朱启华 *et al* 位相扰动下“热像”规律研究 [J]. 激光技术, 2003 27(6): 541~543
 [3] MANES K R, SMMON W W. Statistical optics applied to high power

glass lasers [J]. JO S A, 1982 A2(4): 528~538.
 [4] 钱列加, 张筑虹, 朱宝强 *et al* 相位畸变光束的聚焦特性和光束质量 [J]. 光学学报, 1995 15(2): 166~169.
 [5] 张彬, 吕百达. 有振幅调制和相位畸变光束的聚焦特性 [J]. 中国激光, 1997 24(5): 415~420
 [6] 季小玲, 陶向阳, 吕百达. 高功率激光束的远场特性研究 [J]. 激光技术, 2004 28(3): 251~254
 [7] 何坤娜, 邓罗根. 高斯光束通过非线性介质后的远场衍射图样的研究 [J]. 强激光与粒子束, 2003 15(10): 940~944
 [8] LI Y, WOLF E. Focal shifts in diffracted converging spherical waves [J]. Opt Commun 1981, 39: 211~215.
 [9] LI Y, WOLF E. Focal shifts in focused truncated Gaussian beams [J]. Opt Commun 1982, 42: 151~156.
 [10] BORGH IR, SANTARSEROM, VICALVI S. Focal shift of focused flat-topped beams [J]. Opt Commun 1998, 154: 243~248.
 [11] 彭润伍, 吕百达. 两种处理焦移方法的比较研究 [J]. 激光技术, 2004 28(1): 108~110
 [12] SEGMAN A E. How to (maybe) measure laser beam quality [A]. Trends in Optics and Photonics Series [C]. Washington Optical Society of America 1998, 184~199.
 [13] GARAY A. Continuous wave deuterium fluoride laser beam diagnostic system [J]. SPIE, 1998, 888: 17~22.
 [14] 王云萍, 黄建余, 乔广林. 高能激光光束质量的评价方法 [J]. 光电子·激光, 2001, 12(10): 1029~1033.

(上接第 584 页)

4 结论

针对 S_2 激光管对抽运电源脉冲快放电的要求, 以 Blumlein 电路作为基本电路, 通过分析影响快放电的基本因素, 设计并制做了 Blumlein 电路中的传输线电容和储能电容, 对电路的安装进行了全面的考虑。实验证明, 在充电电压为 9kV 时, 激光管两端电压峰值上升至 13kV, 电压波形上升沿陡峭, 达到 5.08ns 为放电型 S_2 激光管的出光创造了有利的条件。

参考文献

[1] 吴辉, 吴建强. 硫双原子分子激光器脉冲快放电电源的研究 [J]. 光电子·激光, 2003 14(3): 235~238.
 [2] 高允贵. N_2 分子激光器 Blumlein 电路开路输出电压的研究 [J]. 中国激光, 1982 10(3): 147~151
 [3] 吴恒莱. 硫双原子分子横向脉冲快放电激光增益的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1997. 29~40
 [4] 蒋正龙, 姚宗干, 林福昌. 提高脉冲电容器储能密度的试验研究 [J]. 电工技术杂志, 1996(4): 2~3.

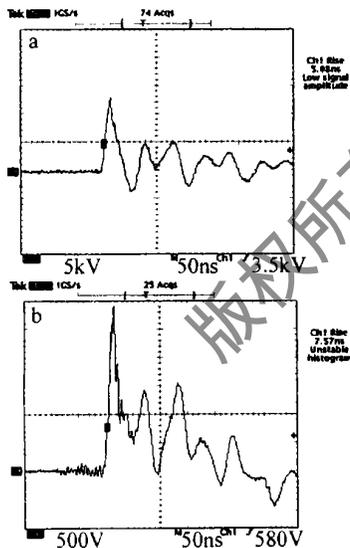


Fig 4 a—wave form of the voltage across the laser tube when $U_0 = 9kV$
 b—wave form of the current across the laser tube when $U_0 = 9kV$