

产生毫微秒脉冲高压的螺旋形带状线发生器的研究*

杨凌云 王毓华 张奇

(中国科学院电子学研究所)

提 要

本文叙述了能产生毫微秒脉冲高压的螺旋形带状线发生器(以下简称 SSLG)的基本原理,给出了具有一个短路开关,内端为高压输出端,外端接地的 SSLG 的设计方法,并提供了为便携式 X 光发生器设计的 SSLG 的制作工艺。对该发生器电性能的实验研究表明:该发生器能输出脉宽 40—100ns、电压 100kV 的高压脉冲。接上 X 光管负载时,在距 X 光管输出窗 1m 处能得到 40—70 μ R 的 X 光辐照量。

一、引 言

X 光管工作需要 100kV 的高压,此量级高压的绝缘问题限制了便携式 X 光发生器的发展。过去此类装置^[1]包括一个外壳,内装 Marx 发生器和 X 光管,两者须高度绝缘,以免短路。X 光管周围有铅屏,挡住 X 光辐射,以免伤害工作人员。此种装置要安全可靠势必就笨重庞大。

许多场合须应用轻便而又安全的便携式 X 光发生器,例如高架桥梁的探伤;为了机场安全对手提行李或邮包等的检查^[2],边远山区的医疗用 X 光透视等。此时要求 X 光发生器对全体人员,甚至包括行李中带的胶卷均是安全的。既要辐照量低,还要具备高的探测能力。研制便携式 X 光发生器的关键是改进产生毫微秒脉冲高压电源。我们基于传输线理论^[3,4],设计了一种产生毫微秒脉冲高压的螺旋形带状线发生器(SSLG),并对其制作工艺和电性能作了实验研究。

二、基本 原理

毫微秒脉冲高压可用电磁法或静电法来产生^[5]。静电法是基于矢量倒向原理。考虑一组最初安排成串联反接的电矢量(图 1(a)),净电压为零。若让相间的电矢量倒向(图 1(b)),则总电压为 $2nV$ (n 为矢量对数)。电矢量倒向可通过在带状传输线中传播的电磁波来实现^[3,4,6],图 2 是两种叠层型带状传输线,(a)称基础型,(b)称封闭型。若让各组

* 1982年10月4日收到。

1983年6月3日修改定稿。

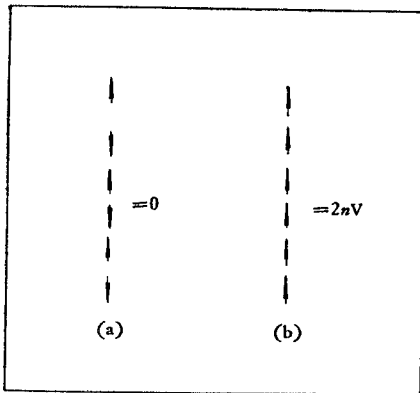


图 1 用相间的电场矢量倒向的电压发生器

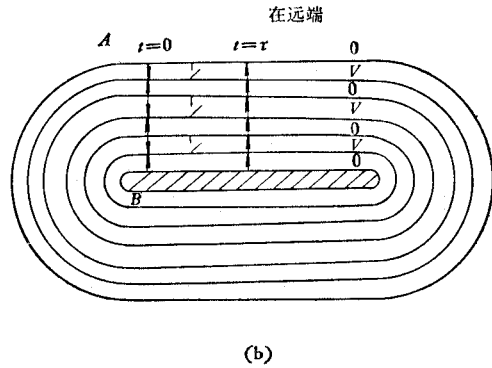
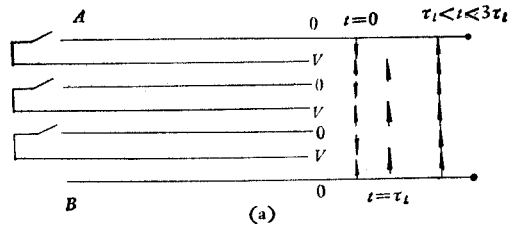


图 2 叠层型带状传输线发生器
(a) 基础型(侧视图) (b) 封闭型(端视图)

带状线预充电至 $V, t=0$ 时,各条带状线同时用开关使输入端短路(对封闭型来说,是相间的带状线上设置短路开关),则开关处将产生反射的电磁波,此波将静电能量转换成电磁能量,而输入端无开关的带状线组(称无源线)上的电矢量则不受影响.令 τ_l 为波由输入端至开路端的传播时间,则 $t = \tau_l$ 时,输出端 A, B 间电压为 nV .由于终端开路(封闭型的终端闭合于自身,看成终端在无穷远处),入射波将在终端全部反射,反射波又将电磁能量转换成反向的静电能量.当

$$\tau_l < t < 3\tau_l,$$

开路端电矢量倒向,输出端 A, B 间电压由最初的串联反接变成串联顺接,输出电压

$$V_0 = 2nV$$

(n 是带状线组数).理想情况下,输出波形为矩形脉冲.

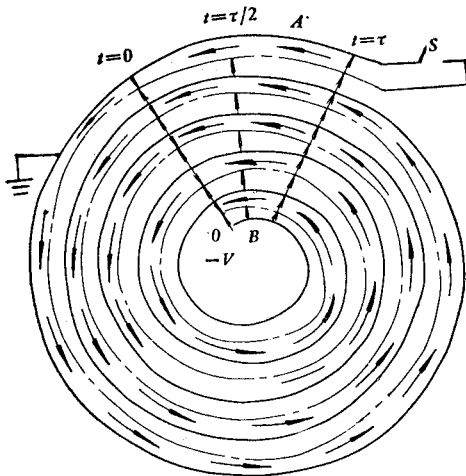


图 3 SSLG 的剖面图(箭头表明在相间的导电箔层内,由开关处开始传播的波的方向)

图 3 所示为一螺旋形带状线发生器^[6],是由两条导电箔,两条绝缘箔交替叠起,再绕成圆筒形线卷,构成具有两个开口端的带状传输线.在一个开口端置放短路开关.螺旋线事先充负电至 $V. t = 0$ 时,开关突然短路,则在导电箔间(有源线内)产生传播的电磁波(沿箭头方向). $t = \tau_l$ 时,导电箔内端 B 和外端 A 间建立起电压 nV (n 为螺旋形带状线

发生器的卷数)。当 $\tau_l < t < 3\tau_l$ 时,产生矢量倒向, A, B 两端电压为 $2nV$ 。等效地讲,相当于 $2n$ 个充电至 V 的同轴电容串联。当反射波第二次到达开关时,从开关反射的波将过程逆转,直至系统恢复原始状态。理想情况下输出波形为带阶梯的三角形脉冲。

三、设计方法

图 3 所示的 SSLG 只有一个短路开关,内端为高压输出端,外端接地。根据分析(见附录),可由下列方程来进行设计:

输出峰值电压

$$V_0 = 2n\beta V_i = \eta_r E_{sx} l_x \quad (\text{V}), \quad (1)$$

脉冲上升时间

$$\tau = n\pi D \epsilon_r^{1/2} c^{-1} \quad (\text{ns}), \quad (2)$$

输出阻抗

$$Z = 240\pi n l_x (\epsilon_r^{1/2} l_{\perp})^{-1} \quad (\Omega), \quad (3)$$

式中 n 为 SSLG 的卷数, β 为损耗因子, V_i 为输入直流电压(V), η_r 为电压倍增, E_{sx} 为通过绝缘箔的场强(V/cm), l_x 为绝缘箔厚度(cm), D 为 SSLG 的平均直径(cm), ϵ_r 为介质的电容率, c 为光速, l_{\perp} 为带状线宽度(cm)。引入 β 是由于有三个因素造成损耗: (1) 短路开关的阻抗, (2) 传输线的电阻, (3) 相邻同轴电容器之间的漏感。这些损耗有可能使 $V_0 < 2nV_i$, 还可能使脉冲前沿加宽以及脉冲后沿出现衰减余弦振荡。 β 可表达成:

$$\beta = \beta_1 \beta_2 \beta_3. \quad (4)$$

(4) 式中 β_1 为开关阻抗引入的损耗因子,它与开关的电感 L_s 造成的时间常数 τ_s 有关, β_1 随 τ/τ_s 的变化如图 4 所示。若 $\beta_1 = 0.9$, 则 $\tau/\tau_s > 20$, 因 $\tau_s = L_s/Z$, 故 $L_s < \tau Z/20$ 。要进一步缩短上升时间,则必须用多路开关。

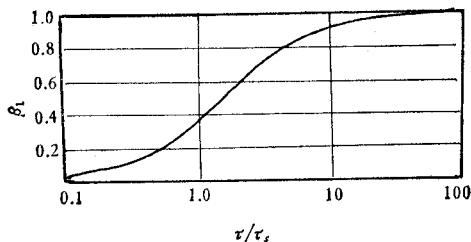


图 4 开关时间常数对发生器输出的影响

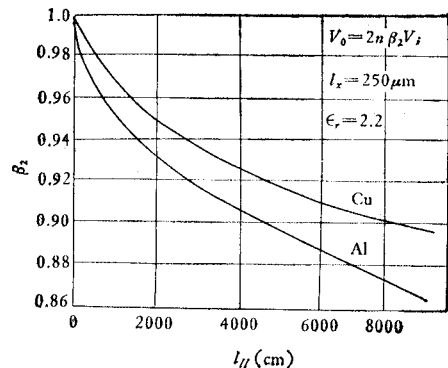


图 5 传输线电阻损耗对螺旋形带状线发生器输出的影响

(4) 式中 β_2 为传输线电阻损耗引入的损耗因子,它与导电箔的长度 $l_{||}$, 厚度 l_x , 传输线的电阻率 ρ_0 和介质电容率 ϵ_r 有关。图 5 所示为用典型参量加以数字计算得到的铜和

铝的 β_2 随 l_H 的变化曲线。据分析知：当 ρ_0 一定时， $\epsilon_r^{1/2} \frac{l_H}{l_x} \leq 10^5$ 时，电阻损耗对输出电压的影响才是小的。

(4) 式中 β_3 的引入是因为带状线发生器由两条连续的导电箔卷绕而成，它不同于分立的同轴电容器。 $t = \tau$ 时，系统可等效成并联 LC'_0 线路 (L 是螺旋线的电感， C'_0 是输出电容)。此系统会出现阻尼余弦振荡。其他时间内，由于卷与卷之间的漏感，系统的性质犹如脉冲变压器，漏泄磁场会造成能量损失。近似分析指出： β_3 随 D/nl_x 的增大而增大。总的说来，发生器的工作下限由短路开关的电感决定，工作上限由几何尺寸决定。R. A. Fitch 指出^[6]：要达到 $\beta \sim 0.5$ 并不困难。 $D/nl_x \sim 70$ 时，曾得到 $\beta > 0.9$ 。他设计的一个 SSLG，在 $D/nl_x = 7.5$ 时， $\beta = 0.4$ 。SSLG 的工作范围如下： $10^4 \text{V} < V_0 < 10^6 \text{V}$ ， $10^{-8} \text{s} < \tau < 10^{-6} \text{s}$ ， $5 < \eta_v < 60$ 。

(1)–(3) 式中， V_0, τ 和 Z 是性能参数， nl_x, l_\perp, D 和 β 是几何参数，其余的 E_{ix} 和 ϵ_r ，则需在制造成本，可靠性和所要求的性能之间折衷确定。因 β 不能直接确定，只能采用逐次逼近法获得最终答案。设计时，可从前 6 个参数中任选 3 个，再求其余的。

我们为便携式 X 光发生器设计了一个输入电压 $V_i = 10 \text{kV}$ ，输出电压 $V_0 = 100 \text{kV}$ 的 SSLG 功率源。设计时，参照了 Bendix-105 型 X 射线源^[2]的性能指标和外形尺寸(外壳长 368mm，截面积为 $127 \times 127 \text{mm}^2$)；还参考了美国专利^[7]。选用聚苯乙烯作绝缘箔 ($\epsilon_r = 2.5$)。最后的设计结果如表 1 所示。

表 1 SSLG 的工作参量和主要几何尺寸

性能参数				几何尺寸 (mm)							
$V_i(\text{kV})$	$V_0(\text{kV})$	η_v	$\tau(\text{ns})$	l_\perp	l_x	D	$n(\text{卷})$	D/nl_x	ϵ_r	总长	外壳直径
10	100	10	50	200	0.15	104	30–50	23–14	2.5	382	216

四、制作工艺

发生器的导电箔用铜箔，一方面它的电阻损耗比铝小，另一方面它能吸收 X 光辐射。实验证明：X 光管四侧有 4.6cm 厚的铜，就能吸收辐照在发生器表面上的 X 光辐射的 98%。Bendix 公司用的是厚为 0.076mm，宽 220mm 的铜箔。我们也曾采用过事先经清洗退火的紫铜箔(厚 0.05mm，宽 200mm)。但若铜箔退火不够，有弹性，容易在聚合过程中收缩而刺破绝缘箔，造成发生器在工作时击穿。所以我们做的发生器大部分用的是铝箔(厚 0.03mm，宽 200mm)。它卷绕方便，但在同样长度下，它的电阻损耗比铜的大，且要另加屏蔽。

绝缘箔选用聚苯乙烯膜(厚 $50 \mu\text{m}$ ，宽 260mm)。它有极好的电气性能：击穿强度为 20–30kV/mm， $\epsilon_r = 2.5$ ，体电阻系数 $\rho_s > 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ ，损耗角正切 $\text{tg} \delta = 2-3 \times 10^{-4}$ ，软化温度为 60–80°C。因此可加热烘烤。Bendix 公司采用的是厚为 $100 \mu\text{m}$ 的聚脂薄膜， $\epsilon_r = 2.2$ ，它不能承受加热。由于绝缘箔太薄会有针孔或气泡，且沿膜纵向各点的击穿强度相

差很大,所以我们将三层膜叠起来用,故总箔厚为 $150\mu\text{m}$ 。

按外导电箔(图 3 中实线)三层绝缘膜,内导电箔(图 3 中虚线)再三层绝缘膜的顺序在卷绕机上卷绕在直径为 90mm 的聚丙烯支持筒上(筒厚 4mm ,筒长 320mm),聚丙烯筒的击穿强度为 $20\text{--}30\text{kV/mm}$ 。还用酚醛树脂筒,但耐压不够。各层平行度由机器自动调节,绕制卷数为 $30\text{--}50$ 卷。外导电箔的最内端要放一宽 10mm 的镀锡铜片作为高压引出头,以便穿过支持筒上的缝与 X 光管的阳极相连,内外导电箔的最外卷也要安放引出头,以便直接与火花球隙相连,并通过同轴电缆与功率源相连。

卷好的 SSLG 要在恒温烘箱中进行烘烤处理。烘烤的目的是:(1)发生定向膜片的局部去定向作用,使纵向尺寸大见收缩,因而各层彼此压紧,挤出层间残存空气,以保证导电箔与绝缘膜间的紧密接触。(2)通过老炼使电容值更趋稳定。(3)使支持筒两端的聚苯乙烯膜热聚合,把两端封死,以免日后受潮气影响。由于发生器各处热起来的速度不同,因此要精确控制升温速度、烘烤温度的上限和烘烤时间(视被烘烤物尺寸而定)。升温太快或温度上限过高均会使支持筒两端的聚苯乙烯膜收缩过快而产生变形。有时甚至局部熔化造成内外导电箔间短路或击穿强度降低。最后的规范是 60°C 下预烘 1.5 小时, $100\text{--}106^\circ\text{C}$ 下热聚合 22—25 分, 60°C 下老炼数小时,然后缓慢冷却一昼夜。初步检查发生器的参数是其电容值。表 2 所示为绕制的几个 SSLG 的卷数和电容值。

表 2 SSLG 的卷数和电容值 ($l_x = 150\mu\text{m}$)

卷数 n (卷)	30 _(Al)	40 _(Cu)	50 _(Al)	60 _(Al)	60 _(Cu)	45 _(Al) , $l_x = 250\mu\text{m}$
电容量 $C_{(nF)}$	0.35—0.37	0.7	0.86	1.1	1.1	0.57

五、测量结果

实验装置和实验原理线路分别示于图 6 和图 7。电源为空载输出约为 13kV 的负直流电源。高压输出端通过同轴电缆连于发生器内导电箔的最外卷,使其充电至负 10kV 。外导电箔的最外端接地。 S 为火花球隙开关,它是二个直径 4mm 的小半球,分别焊在内、外导电箔最外层的引出头上。由图 6 可见: X 光管用硅橡胶固定于发生器内,其阳极与外导电箔的最内端相连;其阴极与外导电箔的最外端相连。给火花球隙一个触发脉冲时,内导电箔与外导电箔瞬时短路,电磁波顺着传输线来回传播,SSLG 就动作起来。输出约 100kV 的高压脉冲,加在 X 光管的阳极与阴极之间, X 光管便产生出 X 光辐射。

发生器输出 100kV 时所需的匹配阻抗 Z 是用实验方法确定的。实验时用水负载代替 X 光管,所谓水负载就是装在直径 55mm ,长 250mm 的有机玻璃筒内的硫酸铜溶液电阻 (R_w),它可承受几百千瓦量级的脉冲功率,且电感很小。分压电阻 R_d 与水负载电阻 R_w 相串联,其上电压降可用 QK-19 高压示波器测量。发生器峰值电压 V_0 可由下式求得:

$$V_0 = h_i SK \quad (8)$$

式中 h_i 为分压电阻上测得的三角形脉冲峰高 (mm); S 为示波器灵敏度 (25V/mm); K 为分压比 (R_w/R_d); R_w 和 R_d 用电桥量测。分压电阻由多个无感金属膜电阻并联,装成同

轴结构,因其电感和对地电容均很小,不会引起输出波形畸变.测出的 $R_d = 0.75\Omega$. K 值还可用毫微秒脉冲发生器来校准 ($\tau = 50\text{ns}$).

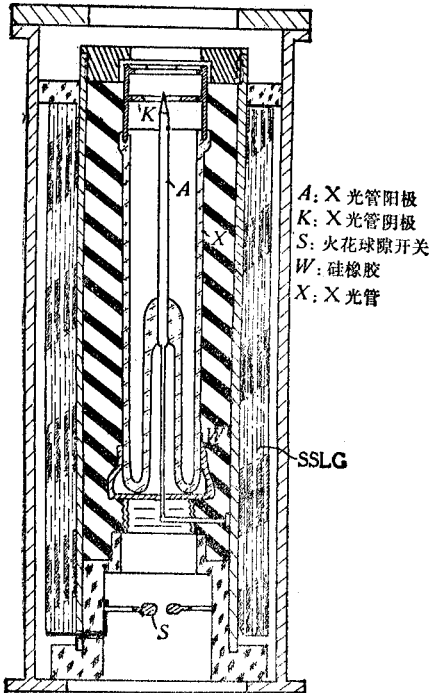


图 6 SSLG 和 X 光管的剖面图

不同水负载电阻值下,发生器输出峰值电压和峰高半宽值的关系示于表 3. 输出电压波形示于图 8. 由表 3 和图 8 可见: 负载电阻在 550Ω 时, 电压倍增最大. 因此匹配负载选为 $400\text{--}500\Omega^*$. 峰值半宽值此时为 100ns , 输出波形近似三角形, 无振荡.

根据 SSLG 要求的匹配阻抗值, 特别设计了 100kV 的 X 光管^[8]. 它可通过 200A 的电流, 并用它作为 SSLG 的负载进行了实验. X 光管安放在 SSLG 的芯子里 (见图 6), 构成便携式

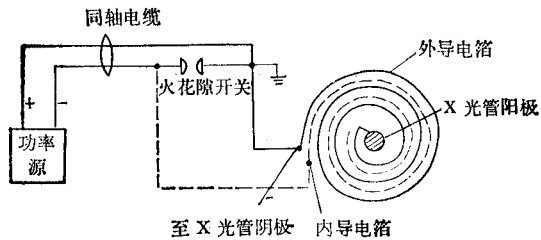


图 7 SSLG 的实验线路原理图

表 3 输出电压和峰值半宽值与水负载电阻值的关系 ($n = 50$ 卷, $C = 0.86\mu\text{F}$, $V_i = 9\text{kV}$ $R_d = 0.75\Omega$)

波形高度 (mm)	负载电阻 (Ω)	分压比	输出电压 (kV)	峰值半宽 (ns)	η_v
21	75	100:1	52.5	30	5.8
14	150	200:1	70	45	7.7
8	280	370:1	74	50	8.2
6	550	730:1	110	100	11
2	950	1300:1	65	150	7.2

X 光发生器, 实物照片为图 9 所示. 在离 X 光管输出窗 0.5 和 1m 处, 用 ZR-1 标准数字伦琴计(上海第六电表厂产品)进行了辐射剂量测量. 测量结果见表 4. 1m 处的辐照量为 $40\text{--}70\mu\text{R}$, 达到 Bendix-105 型的水平^[2].

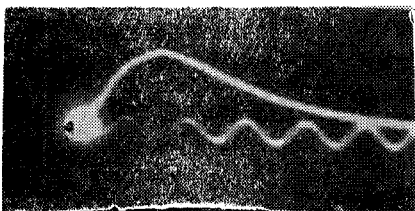


图 8 分压电阻上测得的脉冲电压波形 ($V_i = 6\text{kV}$, $V_o = 67\text{kV}$, $Z = 550\Omega$, $\tau = 0.1\mu\text{s}$, $C = 0.35\mu\text{F}$), 时间间隔 10ns

X 射线穿透实验是这样进行的, 管子出口处附近置放一块金属挡屏, 然后透视摄下一个收信管的 X 光照片, 共曝

* 在输出峰值电压的一瞬间, 发生器可等效成充电至 V_0 的短截同轴线, 只要轴向传播时间大大短于脉冲上升时间 τ (即 $l_1 \ll l_p$), 又用的是快速高压开关, 则其输出阻抗是电阻性的.

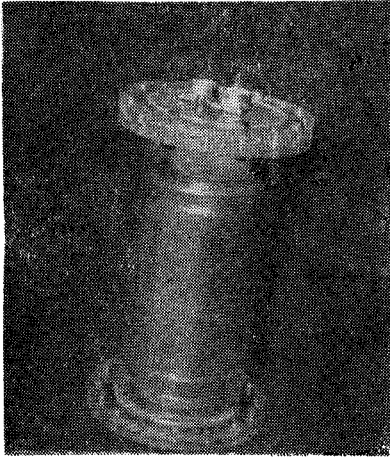


图9 便携式X光发生器的实物照片



图10 用便携式X光发生器摄得的收信管的X光照片

光五次。由图 10 照片看出,能分辨出直径为 0.5mm 的栅极边杆。

表4 便携式X光发生器的性能

V_i (kV)	V_0 (kV)	τ (ns)	0.5m 处 辐照量 (μR)	1.0m 处 辐照量 (μR)
10	空载 220 匹配 110	40—100	250	40—70

六、结 束 语

SSLG 原理上可产生高达 1MV 的电压,结构上又较脉冲变压器简单、紧凑。它的输出功率可通过多种途径来进一步增大。图 11 所示 SSLG 相当于两个串联的发生器。在直径不变的情况下把短路开关放在 $1/2l_{II}$ 处,由于每个发生器的 D/nl_x 增大了,所以输出电压 V_0 也就提高了。图 12 所示为另一种安排^[9]。两个发生器分别供给 X 光管阳极以正电位,阴极以负电位。发生器工作时, X 光管阴阳极间的电压为任一发生器输出电压的两倍。假如加于 X 光管的电压仍为 100kV 的话,则每个发生器只要输出绝对值为 50kV 的电压加于 X 光管,这要比仅用一个发生器,输出 100kV 电压加于管子的要求低得多,绝缘箔击穿的危险也小得多。为使发生器的损耗降低,还可在发生器骨架空着的空间里填放铁氧体材料^[9]。它有高导磁率,因此能减少发生器与邻近导体间的电磁耦合,从而能维持住发生器四周的更强的磁场,增大了发生器的功率。高导磁率材料兼有高电阻,就可与 SSLG 直接接触。

本文主要研究的只是产生毫微秒脉冲高压的 SSLG。作为有实用价值的便携式 X 光发生器,则还有许多工作要做。首先,火花球隙开关应安放在充氮的陶瓷管内,电极球的间隙应可调节,接头电感要小,这样做可以减弱高压放电时的响声。另外,当便携式 X 光

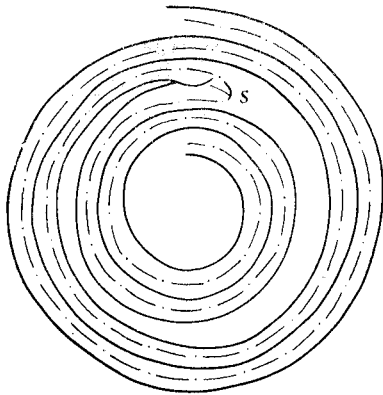


图 11 开关放置在 $1/2l_{\parallel}$ 处的 SSLG

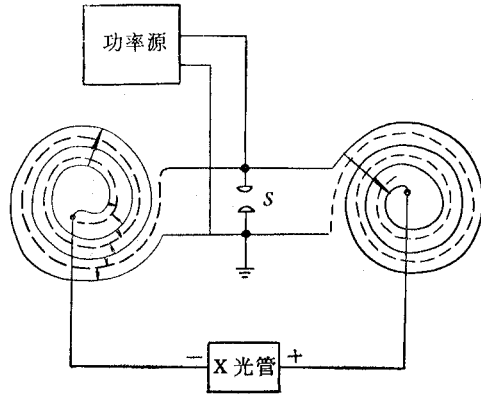


图 12 由两个 SSLG 供电的便携式 X 光发生器的接线图。

发生器配以探测屏、摄像机、像存储器和视频监视器等电子部件时，各系统间的同步问题也需解决。

本项工作得到卞彭教授的指导；参加上述工作的还有王月坡，王培钢和罗爱象同志。X 光管是由于祖哲；刘光治和周华仙同志提供的；上海探伤机厂在机械加工方面曾给予协助；在此一并表示感谢。

附 录

假定一条宽 l_{\perp} ，间距为 l_x 的平行条带传输线，其单位长度的电容 C_0 和单位长度的电感 L_0 分别为

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r l_{\perp}}{l_x} \quad (\text{F/m}), \tag{A-1}$$

$$L_0 = \frac{\mu_0 l_x}{l_{\perp}} \quad (\text{H/m}), \tag{A-2}$$

式中， ϵ_0 为自由空间电容率，等于 $\frac{1}{4\pi c^2} \times 10^7 (\text{F/m})$ ，而 $c = 3 \times 10^8 (\text{m/s})$ ； μ_0 为自由空间导磁率，等于 $4\pi \times 10^{-7} (\text{H/m})$ 。

电磁波在传输线中传播的相速为

$$v_{\varphi} = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}. \tag{A-3}$$

SSLG 中波从传输线一端传到另一端的时间即脉冲上升时间

$$\tau = \frac{n\pi D}{v_{\varphi}} = n\pi D \sqrt{L_0 C_0}. \tag{A-4}$$

将 (A-1) 和 (A-2) 式代入 (A-4) 式得：

$$\tau = n\pi D \epsilon_r^{1/2} c^{-1}. \tag{A-5}$$

传输线的波阻抗为

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}. \tag{A-6}$$

SSLG 的输出阻抗为

$$Z = 2nZ_0 = 2n \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad (\text{A-7})$$

把 (A-1) 和 (A-2) 式代入 (A-7) 式得:

$$Z = 240\pi n l_x (\epsilon_r^{1/2} l_\perp)^{-1} \quad (\text{A-8})$$

参 考 文 献

- [1] 张奇等, 电子学通讯, 2(1979), 56.
- [2] Bendix 公司说明书, Use of X-Ray Inspection for Airline Security, (1972).
- [3] И. П. Марков 著, 晦曦等译, 传输线, 国防工业出版社, 1965年.
- [4] I. A. D. Lewis, et al., 著, 席德明等译, 毫微秒脉冲技术, 科学出版社, 1965年.
- [5] Г. А. Месяц и др. 著, 方波译, 毫微秒高压脉冲的形成, 原子能出版社, 1975年.
- [6] R. A. Fitch, et al., PIEEE III, 4 (1964), 849.
- [7] U. S. Patent, 3, 643, 094 (1972).
- [8] 于祖哲等, 电子学通讯, 2(1980), 85.
- [9] U. S. Patent, 3, 681, 604 (1972).

RESEARCH ON SPIRAL STRIP LINE GENERATOR FOR OBTAINING MILLIMICROSECOND PULSED HIGH VOLTAGE

Yang Lingyun, Wang Yuhua, Zhang Qi
(Institute of Electronics, Academia Sinica)

A basic principle of spiral strip line generator (SSLG) for obtaining millimicrosecond pulsed high voltage is described. Design method of SSLG with a short switch is given. The SSLG's inner end is the high voltage output end, and its outer end is grounded. The working parameters and main geometric sizes of SSLG designed for portable X-ray generator, are also given. Fabricating technology of SSLG is described in detail. Electrical properties of the generator are investigated experimentally. The generator, when connected with X-ray tube, can yield 40—70 μR of X-ray radiation at 1 m from output-window of the X-ray tube.