

MF-100 型 脉 冲 发 生 器*

邢静媛 张儒信 金余恒 姜旭东

(中国科学院原子能研究所)

一、前 言

近几年来,由于电子技术的飞速发展,尤其是电子计算机的广泛应用,许多电子仪器与半导体器件倾向于高速化与数字化。要求具有陡峭上升沿与下降沿的高重复频率的方波脉冲。例如:快速开关二极管,高频三极管与集成电路等半导体器件的开关参数的测试;宽频带示波器与脉冲放大器的时域响应的测试;快速甄别器及快速定标器等电子学仪器的分辨时间等指标的测试。此外,还有试制和测试雷达系统,遥测系统,数字逻辑和计数器的响应等类似用途。

我们所研制的 MF-100 型脉冲发生器就是适用于上述用途的通用脉冲发生器。它具有 2nS 或更小的上升沿与下降沿;重复频率由 1kC 至 100MC;脉冲宽度 4nS 至 100 μ S;脉冲延迟时间 4nS 至 100 μ S;输出阻抗 50 Ω ;输出幅度 ± 80 mV 至 ± 5 V;脉冲基线偏置 ± 1 V;脉冲极性:有 \pm “正常”与 \pm “倒相”四种。此外,还有门输入,外触发输入及触发输出端子。

为了获得具有陡峭的上升沿与下降沿的方波脉冲,有各种途径。一种是用快截止的阶跃二极管,肖特基二极管,隧道二极管及雪崩晶体管等高速半导体器件产生或成形^[1,2,3,4,5]。其优点是电路简单,但其通用性较差。另一种,是目前广泛采用的先进技术,即利用非饱和型电流开关进行产生,放大与成形^[6,7]。我们所研制的 MF-100 型脉冲发生器采用了非饱和型电流开关电路。即充分利用了射极耦合的电流开关电路的特性。以往常用的饱和式开关电路,要做到脉冲上升沿与下降沿陡峭,而且重复频率高是不容易的。因为晶体管工作在饱和区,在关闭饱和晶体管时,需要有一段延迟时间,来使多余的少数载流子逸散,这段延迟时间妨碍工作速度的提高。而电流型开关电路,晶体管是工作在远离饱和区,来减小晶体管存储时间的影响。对于给定的晶体管而言,该线路充分利用了三极管的固有特征频率,因而能获得非常高的开关速度,开关时间接近于晶体管理论上的最小上升与下降时间。但它的缺点是:需要相当多数量的晶体管;晶体管中消耗功率大(而饱和型开关电路消耗功率小)。图 1 是 MF-

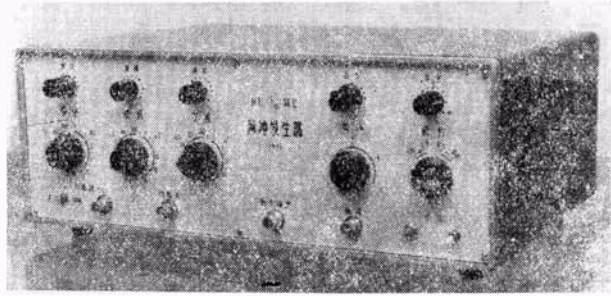


图 1 MF-100 型脉冲发生器外形

100 型脉冲发生器外形照片。

二、工作 原 理

1. 方框图

如图 2 所示。整机电路由时间电路,输出电路及电源三大部分组成。

时间电路决定输出脉冲重复频率,延迟时间和脉冲宽度。而输出电路决定输出脉冲极性,幅度,基线偏置,波形的上升沿与下降沿时间及其波形形状优劣。电源提供电路正常工作电位。

时间电路由时钟电路、延迟电路、宽度电路、相加电路、门输入电路、外触发电路及触发输出等电路构成。输出电路由电流放大器、输出电流求和电路、衰减器、正电流源、负电流源和偏置电流源等电路构成。

2. 电路描述

参看时间电路图(图 3, 4)。时钟电路是由 Q_8 与 Q_9 构成的射极耦合的无稳多谐振荡器。 Q_8 和 Q_9 是它的两个恒流源。用二极管 D_{10} 与 D_{11} 对集电极箝位。定时电容器 C_{201} 至 C_{210} 决定输出脉冲的重复频率的粗调量程,而频率细调是通过 Q_7 改变 Q_8 与 Q_9 的集电极箝位电压而实现。

Q_8 与 Q_9 集电极上互补的方波输出经过二级电流开关(Q_{10} , Q_{11} 与 Q_{12} , Q_{13})成形后,分成两路。其一,直接耦合至触发输出电路(Q_{21} , Q_{22} 与 Q_{23})。经放大成形后,作为触发输出脉冲。其二,直接耦合至延迟电

* 1974 年 4 月 2 日收到。

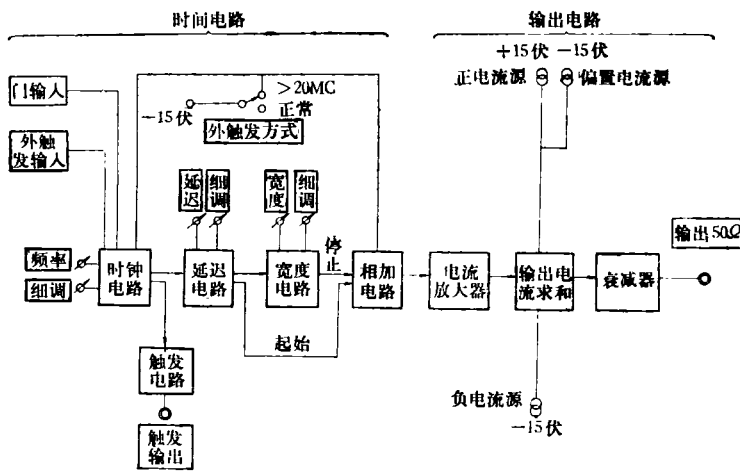


图 2 方框图

路 (Q_{15} 与 Q_{16})。

延迟电路 (Q_{15}, Q_{16}) 是用正负两个恒流源 (Q_{24}, Q_{25}) 交替地为定时电容器 (C_8 至 C_{16}) 充电或放电。然后再经过施密特触发电路 (Q_{17}, Q_{18}) 成形后输出, 此脉冲已相对于触发输出延迟了。其延迟时间量程由定时电容器 (C_8 至 C_{16}) 决定。而延迟细调通过改变定时电容器充电电流来实现。

延迟电路输出经过二级电流开关 (Q_{19}, Q_{20} 与 Q_{21}, Q_{22}) 后又分成两路。一个输出驱动一对共基极放大器 (Q_{40}, Q_{41}), 获得足够大的增益后, 加至相加电路 (Q_{33}, Q_{34})。作为起始脉冲。而另一个输出加至宽度电路 (Q_{17}, Q_{18})。

宽度电路原理类似于延迟电路(从略)。宽度电路的输出加至相加电路作为停止脉冲。

相加电路 (Q_{33}, Q_{34}) 是一个两端输入的电流开关, 在它们的集电极上得到一对互补的方波输出, 其脉冲宽度等于起始脉冲和停止脉冲到达时间之差。它决定了输出脉冲宽度。

相加电路的输出脉冲通过二极管开关矩阵加至输出电路。二极管开关网络 (D_4 至 D_{11}) 相当于一个直流控制的交叉连接的双刀双掷开关。其目的是选择合适的脉冲极性至电流放大器输入端。

外部“门输入”和“外触发输入”信号可加至时钟电路。+1.5V 的信号加至“门输入”(脉冲或直流控制电压)阻止时钟电路。-2V 信号加至“外触发输入”使时钟电路被外部的源所驱动。

当“外触发”方式开关放在“正常”位置时, “输出 50Ω”信号和外触发输入的脉冲宽度无关。当“外触发”方式开关放在“>20MC”位置时, 最大的输出脉冲延迟时间和宽度之和应小于“外触发”输入脉冲宽度。

参看输出电路图(一)(图 5)。时间电路输出经过二极管开关网络加至电流放大器输入端。通过七级电流开关 (Q_1 至 Q_7), 获得足够大的电流增益去驱动输

出电流求和电路(输出电路图 5 中 Q_{20})。

参看输出电路图(二)(图 6)。电流求和电路 Q_{20} 是将来自正电流源 (Q_{21}, Q_{22}), 负电流源 (Q_{23}, Q_{24}) 及偏置电流源 (Q_{25}) 的三个电流相加。并与极性选择开关 (K_7-A 至 K_7-D) 相配合, 可以得到输出脉冲四种极性: “+正常”, “-正常”, “+倒相”与“-倒相”。输出脉冲幅度在 50Ω 负载可得到 ±5V。输出衰减器和幅度控制一起运用, 可使输出幅度由 ±80mV 至 ±5V 连续可调。其中衰减器可提供六种用开关选择的衰减比: 1:1; 2:1; 4:1; 8:1; 16:1 及 32:1。基线偏置可达 ±1 伏。

偏置可达 ±1 伏。

3. 电路中各主要点的波形

(1) 时间电路 其波形如图 7 所示。

(2) 输出电路 其波形如图 8 所示。

下面列表说明, 对应于脉冲不同极性, 在 Q_{20} 集电极(参看图 6)上三个电流 I^+, I^-, I' 及其代数和 $I_{和}$ 得到对应的不同脉冲形态(偏置为 0V)。

从下表(第 48 页)清楚的看到: 正脉冲与负脉冲形态不同之处, 在于正电流源电流 I^+ 不同。在正脉冲形态时, I^+ 为 +120mA; 而在负脉冲形态时, I^+ 为 +20mA(当输出幅度为 5 伏时)。其次, 对于“正常”与“倒相”差别在于电流求和级 Q_{20} 的静止状态不同, 对应的 $I_{和}$ 也不同, 那么在 50Ω 负载上直流电平 V_{Ldc} 也不同, 因此对应的动态输出脉冲的直流电平就倒相了。

而实际上, Q_{20} 工作状态是受极性开关 K_7 选择。极性开关选择时间电路输出端子的不同的静止直流电平及对应的不同极性的方波, 经过七级电流开关直接耦合至电流求和电路 Q_{20} , 使其工作状态转换, 从而得到输出脉冲极性倒相(直流电平翻转)。

三、有关输出波形的几个问题

影响输出波形的形态的因素较复杂。但主要有三点: 1. 与输出电路类型及其晶体管工作点有关系; 2. 与驱动电流波形的形状及其大小有关; 3. 与输出电路负载的类型有关。下面分别叙述。

1. 电路设计特点与工作点的选择

电路设计特点是用非饱和型电流开关作电流放大器, 用集电极接地输入, 基极接地输出电流开关型输出级。从线路上, 已经采用了最快的开关电路。在设计电路时, 要注意工作点的选择, 使晶体管工作远离饱和

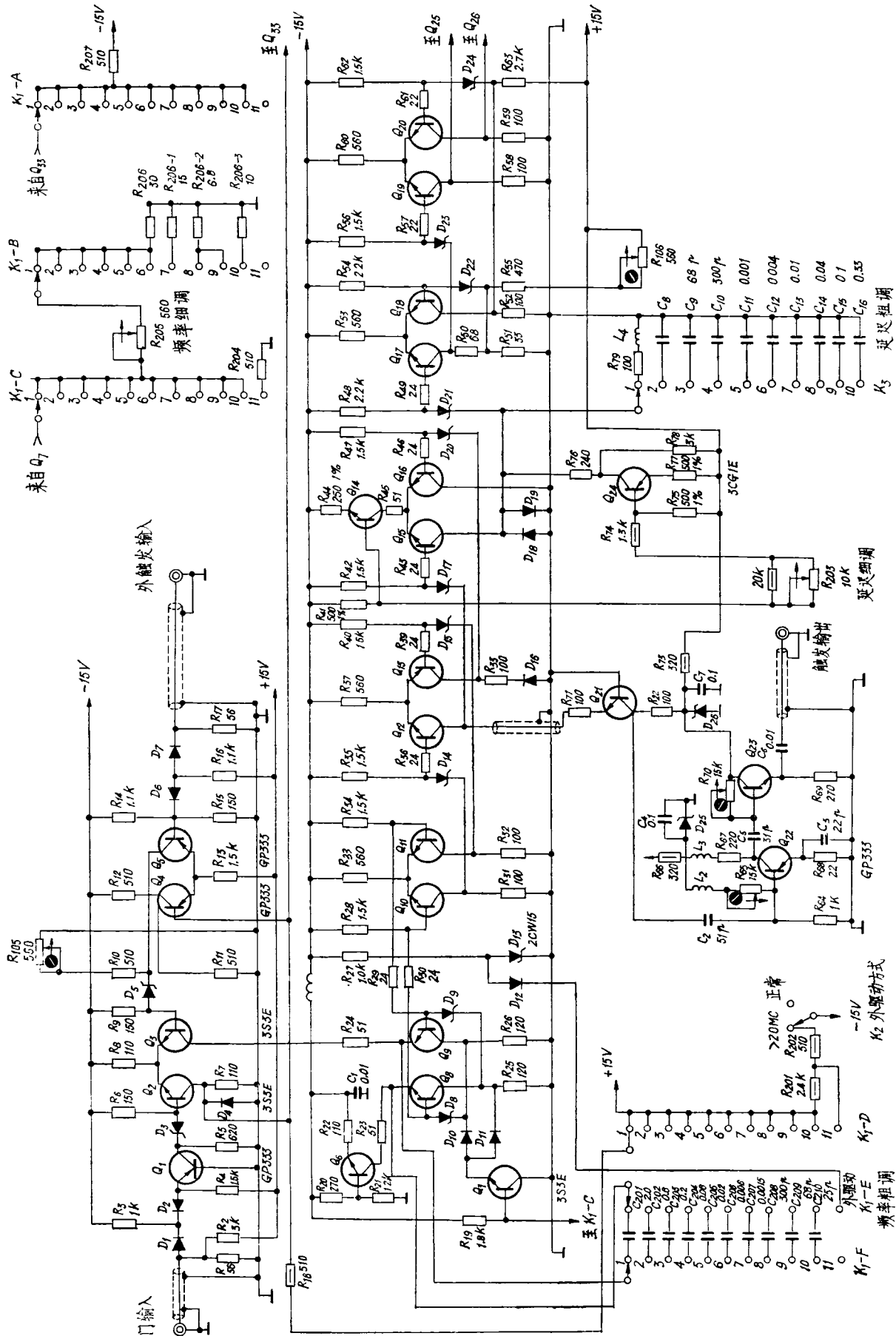


图3 时间电路 (一)

注: 1. 除了注明外所有晶体管为3DG44B; 2. 除了注明外所有稳压管为2CW7C; 3. 所有二极管为2FK58; 4. 除了注明外,所有电阻为 $\frac{1}{4}$ W,单位为 Ω (其他同图); 5. 除了注明外,所有电容单位为 μ (其他同图)。

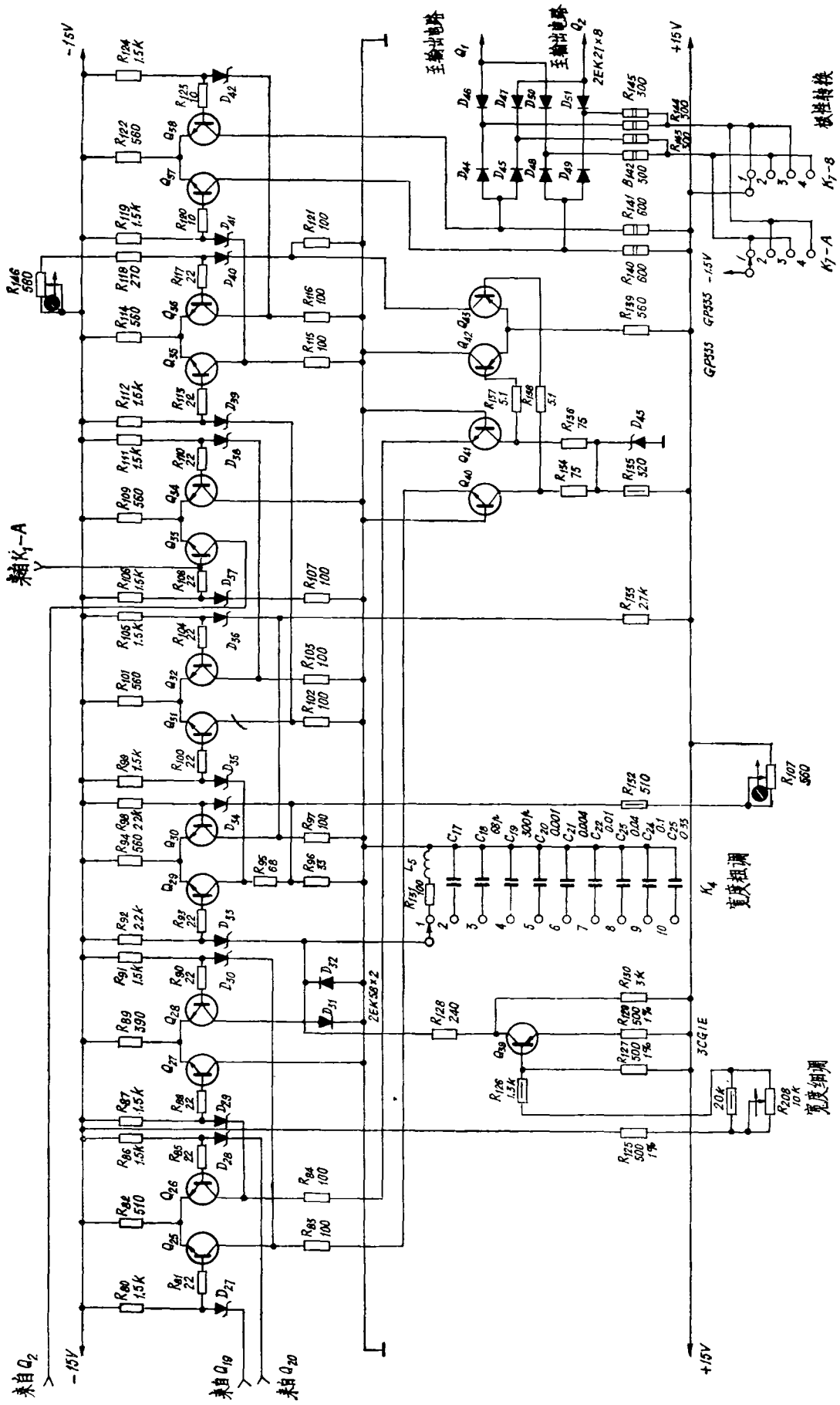


图 4 时间电路 (二)

注: 1. 除注明外所有晶体管为 3 DG 44 B; 2. 所有的稳压管为 2 CW 7 C.

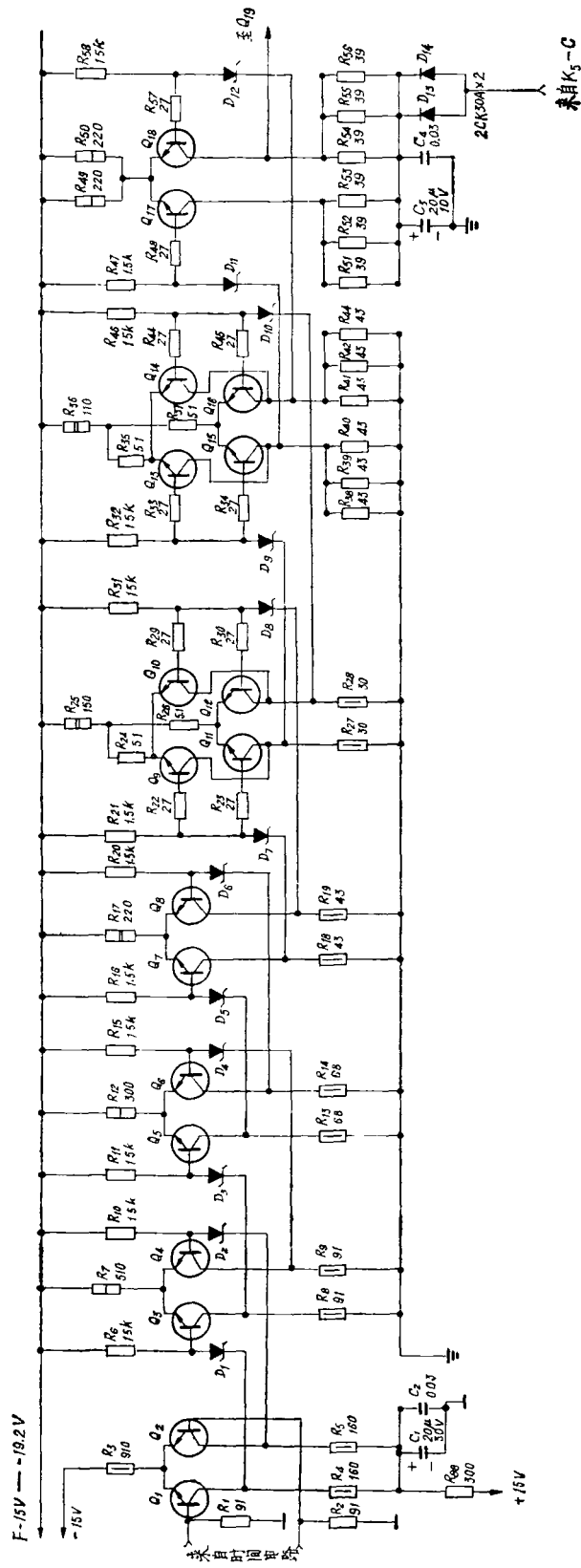


图 5 输出电路 (一)

注: 1. 晶体管 Q_1-Q_{16} 为 2G711C, Q_{17}, Q_{18} 为 CD341; 2. 稳压管 D_1, D_2 为 2CW20, D_3-D_{12} 为 2CW15; 3. \perp 为机壳地, \pm 为浮动地

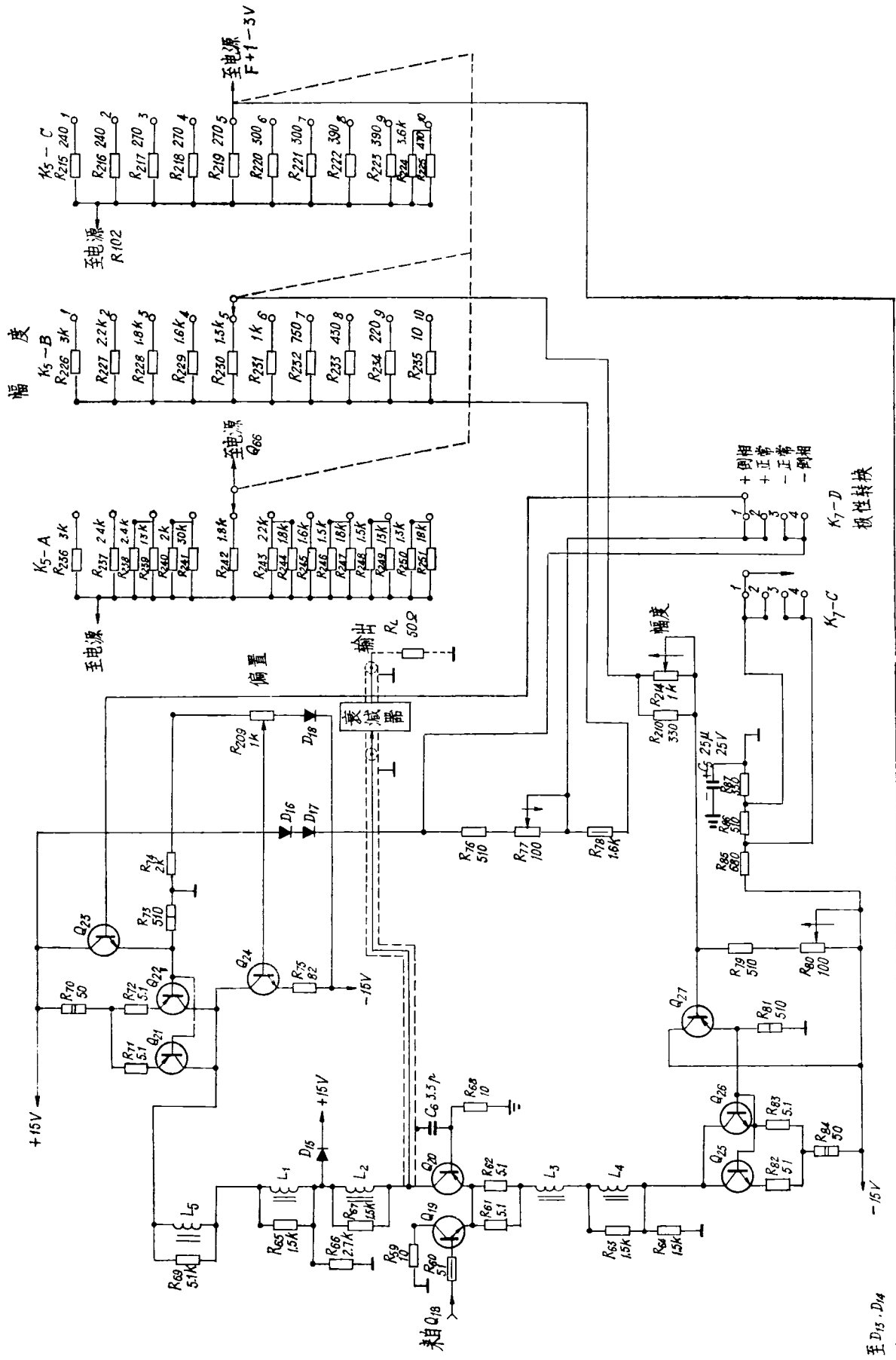


图 6 输出电路 (二)
 注: 1. 晶体管: Q_{19}, Q_{20} 为 CD341, Q_{21}, Q_{22} 为 3CK3 E, $Q_{23}-Q_{26}$ 为 3DK4 B, Q_{27} 为 3CG2 E, Q_{28} 为 2CK13.
 2. 二极管: $D_{15}-D_{17}$ 为 2CK3 A, D_{18} 为 2CK13.

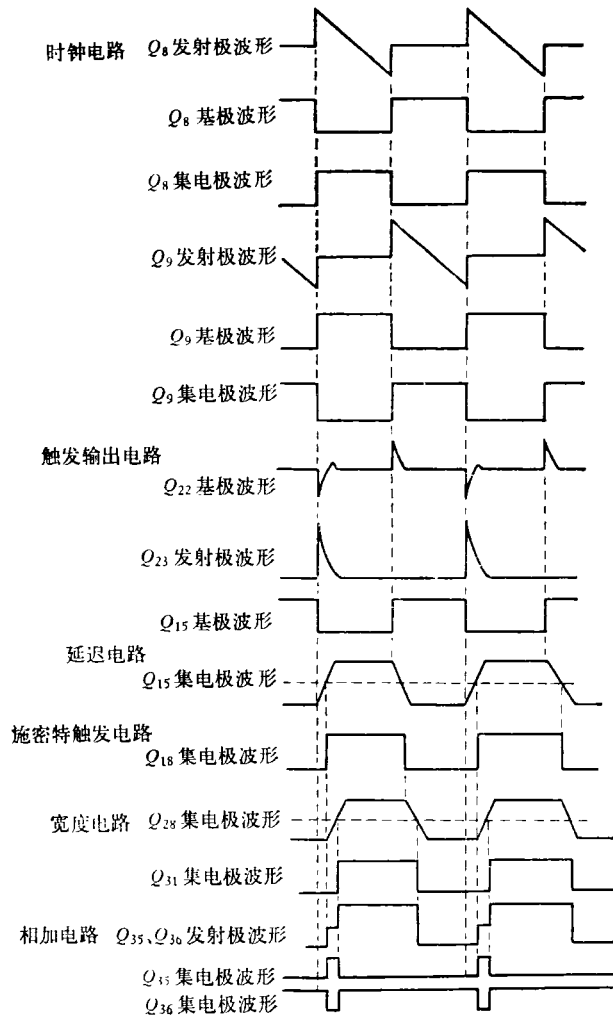


图7 波形示意图

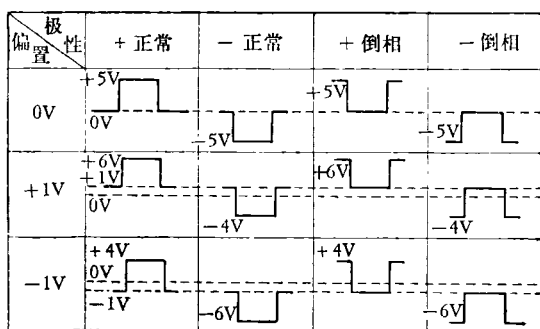


图8 50Ω负载上输出波形

区。

参看图5, 注意输出电路与时间电路的耦合问题。由于时间电路部分采用的是参考“机壳地”的电源, 在其输出端相对于“机壳地”保持负电平 (大约 -2.3 伏或 -1.6 伏), 因此第一级电流开关的集电极电源要接

至参考机壳地的正电位 (大约 +6.8 伏), 这样才能保证其工作在远离饱和区。同样, 由于第二级电流开关集电极电源接至“浮动地”, 而其射极电源接至参考“浮动地”的负电源, 因此, 将第一级电流开关的集电极输出用稳压二极管 2CW20 (稳定电压 16 伏) 直接耦合至第二级电流开关基极。这样, 才能保证第二级电流开关工作在远离饱和区。

电流求和级 Q_{20} (图6) 的基极接浮动地, 为了使 Q_{20} 工作远离饱和区。要设置一个“浮动地”。“浮动地”对于“机壳地”保持负电平, 当“极性”开关 K , 在“+ 倒相”与“+ 正常”位置时, “浮动地”相对于“机壳地”保持 -2.5 伏电平; 而当“极性”开关 K , 在“- 倒相”与“- 正常”位置时, “浮动地”相对于“机壳地”保持 -7.5 伏电平。

2. 驱动电流大小及其形状对输出波形的影响

为了在输出端 Q_{20} (在图6中) 的集电极上得到具

极 性 电 流	状态	静止状态——脉冲之间					动态状态——脉冲持续期						输出波形	
		I^+ (mA)	I^- (mA)	I' (mA)	$I_{和}$ (mA)	V_{s0} (V)	Q_{20} 状态	I^+ (mA)	I^- (mA)	I' (mA)	$I_{和}$ (mA)	V_{s0} (V)		Q_{20} 状态
+倒相		+120	0	-20	+100	+5	截止	+120	-100	-20	0	0	导通	
+正常		+120	-100	-20	0	0	导通	+120	0	-20	+100	+5	截止	
-正常		+20	0	-20	0	0	截止	+20	-100	-20	-100	-5	导通	
-倒相		+20	-100	-20	-100	-5	导通	+20	0	-20	0	0	截止	

注: 上表中 I^+ 表示来自正电流源电流; I^- 表示来自负电流源电流; I' 表示来自偏置电流源电流; $I_{和}$ 表示代数和 $I_{和} = I^+ + I^- + I'$; V_{s0} 表示在 50Ω 负载上输出的直流电平。

有快的上升沿与下降沿的方波。要求驱动它的电流波形具有快的上升沿与下降沿, 并且具有几十毫安到成百毫安的电流。因此, 用七级电流开关级联(参看图5)。通过各级电流开关的发射极电阻及集电极电阻逐级减小达到电流放大及得到快的上升沿与下降沿方波输出, 即, 一方面由于发射极电阻的减小, 使电流开关的工作电流逐级加大; 另一方面由于集电极阻抗的减小, 减小了集电极回路的时间常数, 从而减小了杂散电容及晶体管本身输出电容的影响, 同时还使电流开关在低电平下动作, 从而减小了晶体管开关电路输入电容的影响。因而能获得具有快地上升沿与下降沿, 电流又足够大的驱动电流波形加至电流求和级 Q_{20} 。

当驱动 Q_{20} 的电流增大时, 输出波形的负沿(即输出电平由高电平转换到低电平瞬间) 固然变快, 但波形负沿过冲随之而增大; 即当调节幅度控制时, 输出波形负沿随着幅度减小而变快, 同时波形过冲随着而增大。相反, 当幅度增大时, 负沿变慢、过冲随着而减小。图9所示为输出端波形, 图9a表示驱动电流过大时情形; 图9b表示驱动电流过小情形; 图9c表示驱动电流正合适情形。

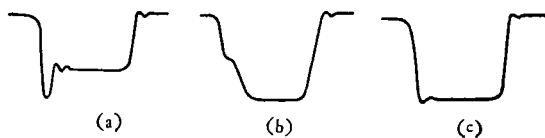


图9 输出端波形

为了得到负沿快及过冲小的输出方波, 而且使当幅度由小到大或由大到小变化时, 波形的负沿快慢及过冲大小变化不大, 在电路中设置一个驱动电流与输出幅度控制同轴的波段开关 K_{s-A} , K_{s-B} , K_{s-C} (参看图6)。这样可以控制驱动电流跟踪幅度控制变化, 使得输出波形上升沿与下降沿既保持快的速度, 又保持过冲小; 即, 上升或下降时间及过冲不随着幅度变化。

3. 补偿电感对输出波形的影响

参看图6, 电感 L_2 是高频补偿小电感。它是补偿输出波形的正沿, 输出电平由低电平转换到高电平瞬间, 相应于 Q_{20} 。由导通状态转换到截止状态的瞬间, 如果不用电感 L_2 时, 输出波形如图11(a)所示。在正沿顶部出现缺角现象。当用电感 L_2 串联在 Q_{20} 集电极上, 可将波形正沿出现的缺角补偿上, 如图10(b)所示。

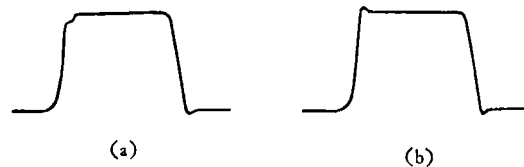


图10 输出波形

(a) 不用高频补偿小电感 L_2 ; (b) 用 L_2

除了上述三点以外, 输出波形还与电路印刷板的安装及输出衰减器、电缆及其接插件的频带宽度有关系。

四、仪器性能

1. 重复频率

内部时钟工作从 1kC 至 100MC , 外部时钟驱动可至 50MC 。重复频率有一粗调 ($1/3/10/30/100/300\text{kC}$; $1/5/20/50/100\text{MC}$), 和一细调 (从 1kC 连续变化到 100MC)。

2. 上升沿和下降沿时间

在额定幅度情况下为 2nS 或更小。

3. 宽度

4nS 至 $100\mu\text{S}$ 。有一粗调 ($4/10/30/100/300\text{nS}$;

1/3/10/30/100 μ S),和一细调连续可变。

4. 延迟

4nS 至 100 μ S。有一粗调(4/10/30/100/300nS; 1/3/10/30/100 μ S),和一细调连续可变。

5. 幅度

从 $\pm 5V$ 至 80mV 连续可变。有一粗调衰减器(1:1; 2:1; 4:1; 8:1; 16:1; 32:1)及一幅度控制(2:1)进行调节。(幅度控制由套轴的电位器及波段开关组成)

6. 输出端阻抗

接阻抗 50 Ω 。输出有短路保护和开路保护。但是,不能在开路情况下工作很长时间。

7. 空度比

正常输出极性时,空度比为 40% 或更小。延迟时间和宽度时间之和不应超过脉冲周期的 40%。此外,把脉冲倒相后可得到 90% 的空度比或更高,由最小脉冲宽度所限制。

8. 基线直流电平位移

可达 ± 1 伏。不论何种极性均可调,输出脉冲可以倒相,使基线为 ± 5 伏(和幅度大小有关),在此情况下,脉冲参考电平仍可调 ± 1 伏。

9. 波形

脉冲正沿过冲小于或等于脉冲幅度的 5%。脉冲负沿过冲小于或等于 10%。

10. 晃动

小于 0.2% + 50PS。

11. 外触发输入

-2V (最佳)脉冲输入。输入阻抗 50 Ω 。当外触发方式开关位置在大于 20MC 位置时,输出脉冲宽度加延迟时间不应超过外触发脉冲宽度。当置于“正常”位置时,输出脉冲和驱动脉冲宽度无关。

12. 触发输出

正脉冲,最小幅度 1 伏(在 50 Ω 负载上)。

13. 门输入

+1.5V (最佳)脉冲或等效电平来阻止脉冲串。

14. 电源要求

220 伏交流, 50/60 赫,总耗电 100VA。

15. 温度

环境温度最高可达 40 $^{\circ}C$ 。宽度、延迟、幅度的温度系数小于 0.5%/ $^{\circ}C$ 。重复频率在 30/100/300kC 及 1/5/20/50/100MC 量程小于 1%/ $^{\circ}C$,对于 1/3/10/30 kC 小于 3%/ $^{\circ}C$ (与各量程的定时电容器的温度系数有关)。

16. 尺寸

高 \times 宽 \times 深 = 155 \times 430 \times 320 (mm³)

重量: 10 公斤。

17. 输出波形照片

图 1 中照片表示 MF-100 型脉冲发生器的输出波形。

照片 1 与 2 的波形是用频宽 150MC 示波器拍照的输出波形。照片 3 至 10 是用频宽 7000MC 取样示波器拍照的输出波形。下面分别叙述:

照片 1: 当 MF-100 型脉冲发生器工作在重复频率为 100MC 时输出波形。

照片 2: 照片上面的波形表示门输入脉冲,下面的波形表示 MF-100 型在有门输入时对应的输出波形。

照片 3: 当 MF-100 型脉冲发生器的极性开关在“+ 倒相”位置时,输出波形的前沿,它可表示出上升时间及过冲大小。

照片 4: 表示当 MF-100 型脉冲发生器的极性开关在“+ 倒相”位置时,输出波形的后沿,它可表示出波形的下降时间及过冲大小。

照片 5: 表示 MF-100 型脉冲发生器的极性开关在“+ 正常”位置时,输出波形的后沿,它可表示出波形的上升时间及过冲大小。

照片 6: 表示 MF-100 型脉冲发生器的极性开关在“+ 正常”位置时,输出波形前沿,它可表示出输出波形的下降时间及过冲的大小。

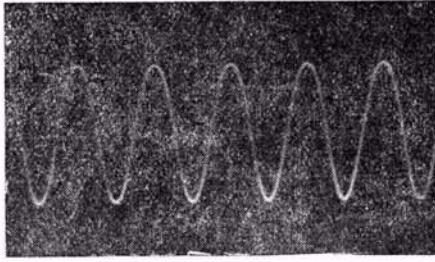
照片 7: 表示 MF-100 型脉冲发生器的极性开关在“- 正常”位置时,输出波形的后沿,它可表示出波形的上升时间及过冲大小。

照片 8: 表示 MF-100 型脉冲发生器的极性开关在“- 正常”位置时,输出波形的后沿,它可表示出波形的下降时间及过冲大小。

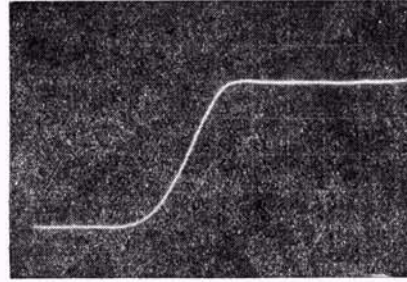
照片 9: 表示 MF-100 型脉冲发生器的极性开关在“- 倒相”位置时,输出波形的后沿,它可表示出波形的上升时间。

照片 10: 表示 MF-100 型脉冲发生器的极性开关在“- 倒相”位置时,输出波形的后沿,它可表示出输出波形的下降时间及过冲大小。

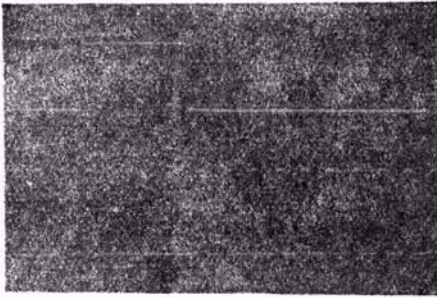
本仪器的主要性能指标虽然已经达到了。但还存



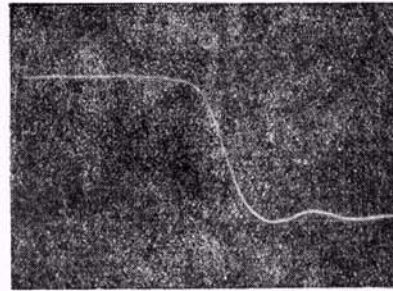
照片 1. 100 MC 时输出波形
垂直灵敏度 0.1 伏/格
水平扫速 5 nS/格



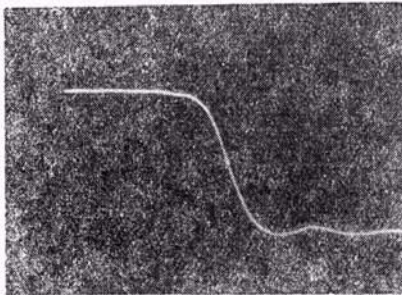
照片 5. 极性在“+正常”时输出波形前沿
垂直灵敏度: 0.2 V/格
水平扫速: 1nS/格



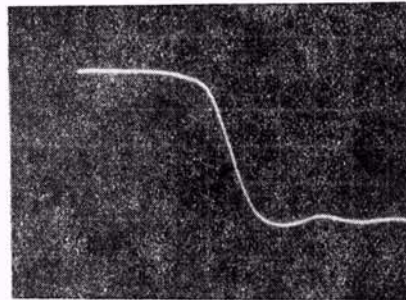
照片 2. 有门输入时输出波形。
上面是门输入信号波形;
下面是 MF-100 型输出波形。
垂直灵敏度: 1V/格
水平扫速: 0.5 μ S/格



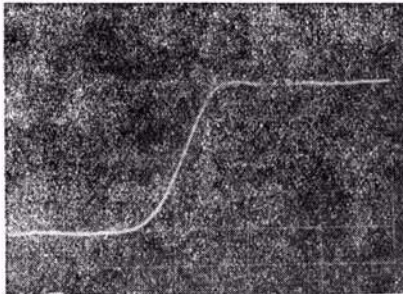
照片 6. 极性在“+正常”时输出波形后沿
垂直灵敏度: 0.2 V/格
水平扫速: 1nS/格



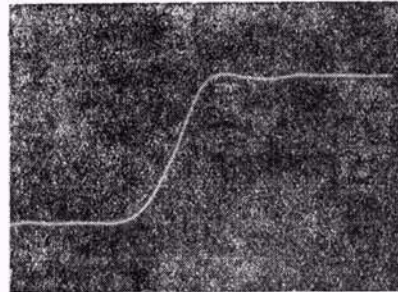
照片 3. 极性“+倒相”波形前沿
垂直灵敏度: 0.2 V/格
水平扫速: 1nS/格



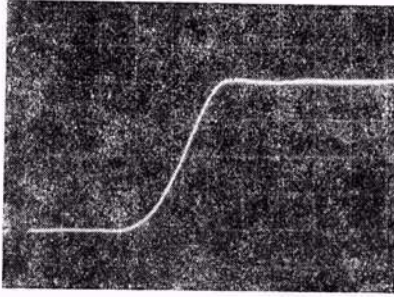
照片 7. 极性在“-正常”时输出波形前沿
垂直灵敏度: 0.2 V/格
水平扫速: 1nS/格



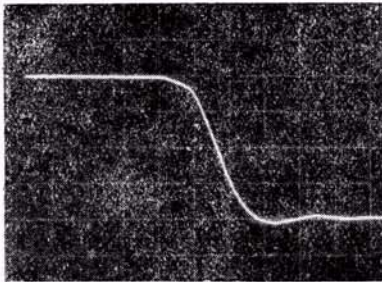
照片 4. 极性在“+倒相”时波形后沿
垂直灵敏度: 0.2 V/格
水平扫速: 1nS/格



照片 8. 极性在“-正常”时输出波形后沿
垂直灵敏度: 0.2 V/格
水平扫速: 1nS/格



照片 9. 极性“—倒相”时输出波形前沿
垂直灵敏度: 0.2 V/格
水平扫速: 1nS/格



照片 10. 极性在“—倒相”时输出波形后沿
垂直灵敏度: 0.2 V/格
水平扫速: 1nS/格

图 11 输出波形照片

在着一些需要进一步研究和改进之处。

1. 重复频率的覆盖系数在各量程不一致性, 尤其是在频率高端量程的覆盖系数提高问题。要选择时钟

电路中 Q_8 与 Q_9 (在图 3 中为高频功率增益大的晶体管, 即特征频率 f_T 高、基极电阻 r_{bb} 与集电极电容 C_{ob} 小的高频晶体三极管为佳。其次, 要选择 Q_9 (在图 3 中为错的 npn 型晶体管 (基极与发射极之间电位 $V_{eb} \leq 0.3$ 伏)。

2. 输出波形的负沿快慢及过冲大小随着基线偏置电位的增高而变快及过冲增大。这是由于基线偏置电位的改变, 实际上是改变了电流求和级 Q_{20} (图 6 中) 的集电极与发射极之间的电位 V_{ce} , 因而此管的 f_T 值也随之变化, 从而使输出波形负沿的快慢及过冲有变化。要注意选择 Q_{20} 管的高频参数, 以便获得良好的输出波形。

参 考 资 料

- [1] *Need Square, Waves in the MHZ Range, Electronic Design*, 19-11 (1971), 68.
- [2] 四方, 孝明·田迈哲司, «超高速パルス発生器», «电子科学»(日), 20-3 (1970), 33-44.
- [3] Andrews, J. R., *Improved Bias Supply for Tunnel-Diode Picosecond Pulse Generators, Ieee Transactions on Instrumentation and Measurement*, IM 19-3 (1970), 171.
- [4] 山口, 幸彦, «特殊パルス発生器 1105A/1106A», «电子計測», 8-4 (1968), 23-25.
- [5] Fraser, H. J., *Variable Width Pulse Generator Using Avalanche Transistors and Charge-Storage Diodes, Nucl Inst Meth*, 40-1, 106.
- [6] 奥秋, 正治, «特殊パルス発生器 EH-122».
- [7] 长岐芳郎, «汎用パルス発生器 MG410A», «电子計測», 8-4 (1968), 8-11.

(上接第 20 页)

- [9] Marwitz, J. D., *J. Appl. Met.* 11 (1972). No. 1. 166-201.
- [10] Hart, H. E. & Cooper, L. W., *Proc. 13th. Radar Met. Conf. A. M. S.* 1968. 8. 20-23. Canada. 196-201.
- [11] Battan, L. J. & Theiss, J. B., *J. Atmo. Sci.* 28 (1966), 78-87.
- [12] 顾震潮, 雷电活动的单站定位问题, 科学通报, 1965年 11 月号, 973-977.
- [13] Browning, K. A. & Ludlam, E. H., *Q. J. R. Met. Soc.* 88 (1962). 117-135.
- [14] Шметер, С. М., *Физика Конвективных Облаков. Гидрометеиздат.* 1972. Л.
- [15] Fankhauser, J. C., *Mon. Wea. Rev.* 99 (1971). No. 3. 171-192.
- [16] Сулаквелидзе, Г. К., *Ливневые Осадки и Град. Гидрометеиздат.* 1967. Л.
- [17] Favreau, R. F. & Goyer, G. G., *J. Appl. Met.* 6 (1967). 332-335.
- [18] Сулаквелидзе, Г. К., Севастьянова, Т. В., *Мет. и Гидро.* 1968. № 11. 63-68.
- [19] ———, Лапчева, В. Ф., *Труды ВГИ. Вып. 13* (1969), 4-34.