

环形脉冲发生器中的超快光电导开关

顾冠清 陈兰荣 支婷婷 范滇元

(中国科学院上海光机所, 201800)

提要: 一种新型的由电压充电传输线(VCTL)及本征硅光电导开关组成的极快电脉冲发生器已研制成功。采用波长为 $1.06\mu\text{m}$ 、脉宽为 80ps 的激光脉冲激励环形电路中的开关, 可以获得具有极快上升下降沿(小于 200ps)、宽度决定于环形线长、开关效率决定于负载的纳秒方波脉冲。

关键词: 光电导开关

Ultrafast optoelectronic switching in circular pulse generator

Gu Guangqing, Chen Lanrong, Zhi Tingting, Fan Dianyuan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

Abstract: A novel ultrafast electronic pulse generator system consisting of a voltage charged transmission line(VCTL) and an intrinsic silicon optoelectronic switch has been successfully developed. The switch in the circular circuit is illuminated by a laser pulse at $1.06\mu\text{m}$ wavelength and 80ps width. A nanosecond square-wave electronic pulse with an ultrafast risetime and falltime(less than 200ps) and a width determined by the length of the transmission line and switching efficiency limited by the load has been obtained.

Key words: photoconductive switch

一、引言

作为快速脉冲源, VCTL 储能开关成形脉冲系统已被广为应用。70 年代以来, 国外用具有高电阻率半导体材料如 $\text{Si}^{[1]}$, $\text{Cr:GaAs}^{[2,3]}$, $\text{InP}^{[4]}$ 等作为开关介质获得极快脉冲的方法发展迅速。一般地, 脉冲成形结构在理想情况下只能获得 VCTL 电压的一半, 并且要求严格的匹配负载。O. S. Chang^[5] 等人在 Blumlein 脉冲发生器中采用硅片开关获得快脉冲, 虽然在严格匹配的负载上得到接近充电电压的幅值, 但其电压波形后沿存在严重的尾脉冲, 有限的开关接触电阻和导通电阻大大改变了 Blumlein 端线的理想边界条件。我们研制的新型环形 VCTL 半导体开关成形脉冲系统, 可以采用任意纯阻抗负载, 并且负载上获得电压幅值由负载大小决定, 最大输出为 VCTL 电压, 所得脉冲波形具有快速前后沿。由于载流子注入和热散失, 在高压直流偏压下, 半导体硅开关的电压承受能力受到限制。

二、发生器结构与原理简述

如图 1(a) 环形电路。传输线双导体中的一个导体之起端与终端相连。直流电压 V 通过 R 给闭合导体充电。另一导体分别通过匹配电阻 R_0 和负载 R_L 接地, 开关 K 接在闭合导体与地之间。如图 1(b) 为环形电路的等效电路, 开关 K 等效为 $K-1$ 和 $K-2$, 环形导体长为 L , 双导体特性阻抗为 Z_0 , 闭合导体充电至 V_{DC} 。由双导体中的电压波动方程, 根据起始条件和边界条件可以解得负载 R_L 上的 $V(t)$ 表达式为

$$V(t) = \frac{V_{DC} R_L}{R_0 + Z_0} \left[u(t) - u\left(t - \frac{L}{v_p}\right) \right] \quad (1)$$

式中 v_p 为波速。 $u(t) = 0$, 当 $t < 0$ 时; $u(t) = 1$, 当 $t \geq 0$ 时。

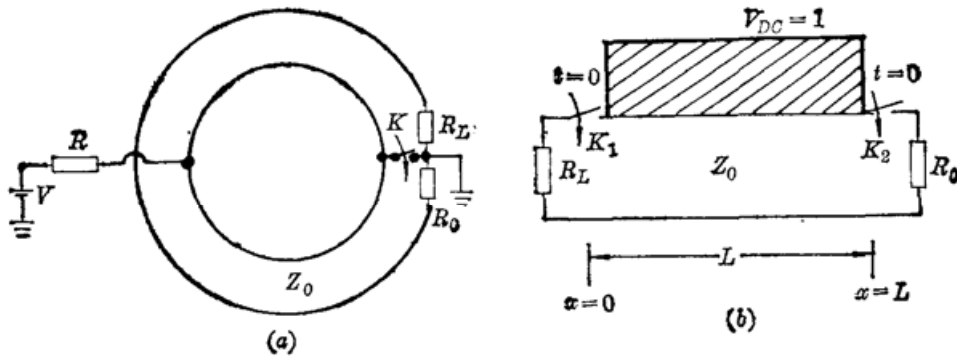


Fig. 1. Schematic diagram and equivalent circular circuit

我们也可以用波的概念来解释。在图 1(a) 中, 当开关 K 闭合后, 波过程在传输线的两个端点同时开始, 因为传输线的一个端点是匹配的 ($R_0 = Z_0$), 所以在此端点上不产生反射, 并且不管 R_L 为何值时都不出现重复脉冲, 负载 R_L 上的脉宽等于波从传输线一端到另一端所走的时间。在这种环形电路中, 电压和电流的幅度由下列公式确定:

$$u_L = \frac{V_{DC} R_L}{R_n + Z_0} \quad (2)$$

$$I_L = \frac{V_{DC}}{R_L + Z_0} \quad (3)$$

如果 $R_L = Z_0$, 则 $u_L = \frac{1}{2} V_{DC}$ 和 $I_L = \frac{V_{DC}}{2Z_0}$, 电压输出效率为 50%, 亦即电压和电流的幅度与开路 VCTL 电路^[1]所产生的电压和电流幅度相同, 但脉冲能量小一半, 因为能量的一半消耗在匹配电阻上, 而另一半消耗在负载上。当 $R_L \rightarrow \infty$ 时, $u_L \rightarrow V_{DC}$, 输出电压极限效率为 100%。

三、光电导开关电阻的表征

上述开关 K 的工作视为理想情况。即 $t < 0$ 时, $R_{off} = \infty$; $t \geq 0$ 时, $R_{on} = 0$ 。采用半导体材料作为开关介质, 在相应激光短脉冲作用下, 介质体电阻 R_b 显著下降, 但由于介质载流子的浓度有限, R_b 不可能为 0。在线性模式下, 当激励光脉冲宽度小于介质载流子复合时间时, 开关介质导通电阻由下式给出

$$R_{on} = \frac{L^2 E_{ph}}{E_1 e u_{eh} (1-r)} \quad (4)$$

式中, L 为沿电场方向介质长度, E_{ph} 为激励激光光子能量, E_1 为激励激光总能量, e 为电子电荷电量, u_{eh} 为有效电子、空穴迁移率, r 为介质入射面光反射率。

对于 $L=1\text{mm}$ 本征硅开关介质, 用 $1.06\ \mu\text{m}$, $12\ \mu\text{J}$ 激光脉冲激励开关, 介质导通电阻小于 $5\ \Omega$ 。为了使介质工作更接近理想状态, 在介质表面激光损坏阈值内, 应尽可能提高激励光能, 以减小导通电阻。

四、性能测试与结果分析

基于本征硅在常态下具有较高的电阻率 ($\rho \approx 10^5\ \Omega \cdot \text{cm}$), 用它作为光电导开关具有速度快抖动小, 载流子复合时间为几百 μs 量级。我们用 $1 \times 2 \times 2\ \text{mm}^3$ 本征硅晶体 ($L=1\ \text{mm}$) 作为开关介质研制出图 2 中环形脉冲发生器的开关^[6]。图中, A 为 Nd:YAG 主被动锁模振荡器; B 为激光单脉冲选择仪; C 为单脉冲多重放大器; D 为环形脉冲发生器(阴影部分为硅开关)。晶体与传输线导体间采用功函数低于 $4\ \text{eV}$ 的钢材料, 使获得强欧姆接触, 以至 R_{con} (接触电阻) $\rightarrow 0$ 。(这里忽略高频时电极趋肤效应引起的表面电阻值)。双导体采用同轴电缆 ($Z_0=50$)

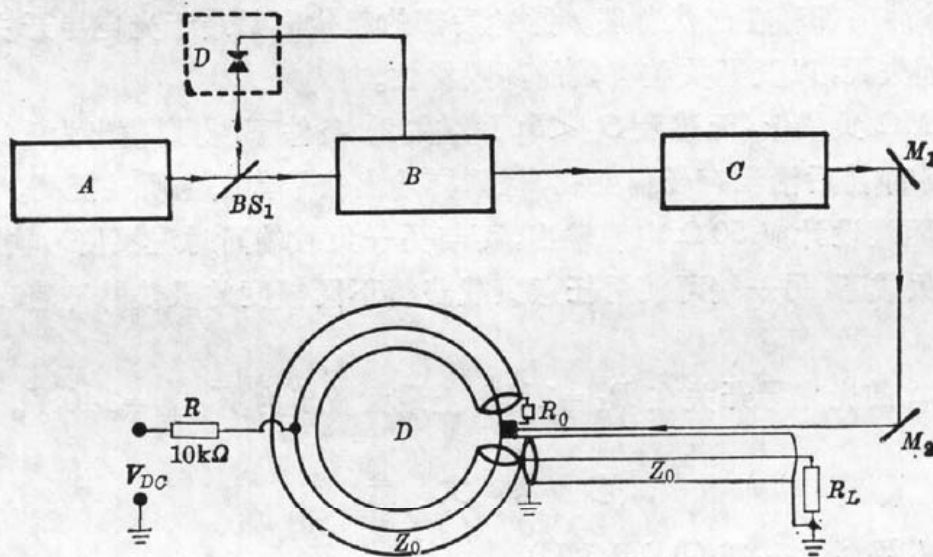


Fig. 2. Diagram of test apparatus

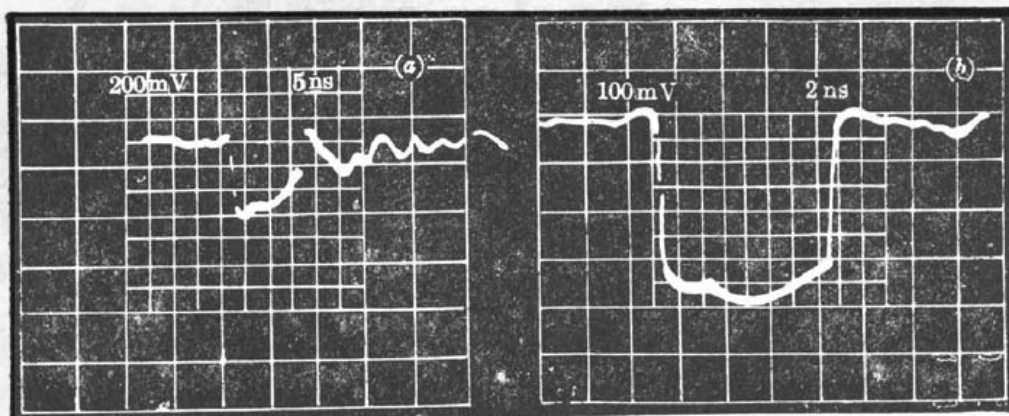


Fig. 3. Output voltage waveform of circular circuit

(a) $E_1=5\ \mu\text{J}$; (b) $E_1=15\ \mu\text{J}$

Ω), 长度 $L=3\text{ m}$, 匹配电阻 $R_0=50\ \Omega$, 负载通过 $50\ \Omega$ 电缆连接开关系统。测试装置如图 2。

图 2 中, 激励激光单脉冲波长 $\lambda=1.06\ \mu\text{m}$, 宽度 $\tau\approx 80\ \text{ps}$, V_{DC} 采用 $15\ \text{V}$ 。在对应不同的激光能量下, R_L 负载 ($R_L=50\ \Omega$) 上得到不同幅度和波形的输出。

1) 图 3(a) 表明当激光脉冲能量 $E_1=5\ \mu\text{J}$ 时负载上测得的电压波形。相同能量下测得开关导通电阻约 $10\ \Omega$ ^[7], 与理论值基本一致。由照片看出, 电压脉冲尾部产生严重的振荡波形, 这

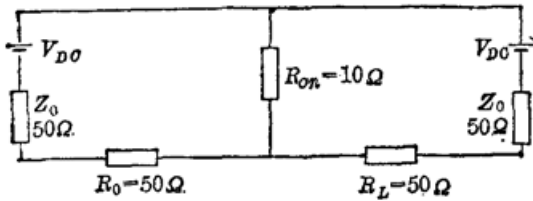


Fig. 4. Equivalent circular circuit when $t=0$

是因为此时双导体双端传输失配并具有 $P\approx 9.1\%$ 的反射率, 重复振荡周期为行波在双导体中单程传输时间。另外, 在硅开关打开瞬间环形电路等效为图 4。由理论计算得电压主脉冲幅度为 $6.25\ \text{V}$, 实际测得为 $6.0\ \text{V}$ 。

2) 图 3(b) 表明当激光脉冲能量 $E_1=15\ \mu\text{J}$ 时负载上测得的电压波形。同样测得开关导通电阻约 $3.5\ \Omega$ 。由图中看出, 此时电压波形呈方形, 半峰全宽为 $15\ \text{ns}$, 与理论一致; 脉冲峰值电压为 $7.42\ \text{V}$, 电压获得效率为 49.5% ; 在仪器测试精度范围内, 脉冲上升、下降时间 T_R 、 T_F ($10\% \sim 90\%$) 均小于 $500\ \text{ps}$, 而实际脉冲升降沿时间 (与激励光脉冲宽度、光电导开关响应时间、传输线频宽及开关高频结构有关) 估计小于 $200\ \text{ps}$ 。另外由于激励光源信噪比有限, 主脉冲前部存在杂散光, 致使脉冲前部存在起伏背底。脉冲后部的起伏应归结于光电导开关存在有限的 R_{on} 值, 导致匹配端失配, 以及开关腔有限的高频特性。

3) 在 $R_L=1\ \text{M}\Omega$ 负载上 (无感及 $C_L<5\ \text{pF}$), 在 2) 条件下, 得到输出为 $14.8\ \text{V}$, 电压获得效率约 98.7% 。脉冲前后沿没有任何变化, 但同样输出信号背底也明显提高。

将 R_0 匹配电阻端设计成 $50\ \Omega$ 电缆输出, 可与另一负载端同时观察信号输出, 并且在保证任一端匹接 $50\ \Omega$ 负载下, 另一端可使用任意负载获得不同幅度的极快脉冲输出。此时电路储能得到充分利用。

上述 $L=1\ \text{mm}$ 的光电导开关在 $R_L=1\ \text{M}\Omega$ 上最大输出为 $V_{omax}=140\ \text{V}$ 。

参 考 文 献

- 1 D. H Auston, *Appl. Phys. Lett.*, **26** (3), 101(1975)
- 2 Chi. H. Lee, *Appl. Phys. Lett.*, **30** (7), 84(1977)
- 3 A. Antonetti *et al.*, *Opt. Commun.*, **23** (3), 435(1977)
- 4 F. J. Leonberger, P. F. Moulton, *Appl. Phys. Lett.*, **35** (9), 712(1979)
- 5 C. S. Chang *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **41** (5), 392(1982)
- 6 支婷婷, 陈兰荣, *光学学报*, **3**(4), 369(1983)
- 7 顾冠清 *et al.*, *应用激光*, **11**(3), 123(1991)