

Blumlein 型高效率微带光导开关研究*

鲍吉龙** 许长存 石顺祥 过巴吉

(西安电子科技大学技术物理系, 西安 710071)

提要 提出了一种高效率 Blumlein 型微带光导开关电路, 并从理论上分析了该光导开关电路的输出特性和不同光功率激励下的工作特点, 分析指出这种光导开关具有 100% 的电压转换效率。实验结果得到了 93% 的电压转换效率, 和理论分析结果相吻合。

关键词 光导开关, 超短脉冲, 电压转换效率

1 引言

近年来, 利用超短光脉冲及半导体光电导效应的光导开关技术, 由于在光计算、光通讯^[1]、微波产生和控制^[2]、微波辐射和接收^[3]、冲激雷达^[4]及生物、化学等许多技术领域具有广泛应用, 因此引起了人们的极大兴趣。

在这一技术的研究中, 人们普遍采用 1975 年 Auston^[1] 提出的光导开关结构, 如图 1 所示。这种结构电路的电压转换效率很低, 输出电脉冲峰值最多只能达到偏置电压的 50%, 因此当要求光导开关产生数千伏甚至数万伏的高压、大功率

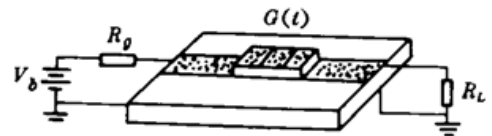


Fig. 1 The principle scheme of Auston P. S.

电脉冲时, 一方面偏置电源的设计变得十分复杂, 且造价昂贵; 另一方面也将使光导开关的载流子高压注入和热失控问题变得十分严重, 从而限制了光导开关的高压、大功率应用。为了解决这一问题, 作者将 Blumlein 电路引入光导开关的设计, 提出了一种高效率微带光导开关电路, 如图 2 所示。理论上这种光导开关可以实现 100% 的电压转换, 我们在实验中已经得到了 93% 的电压转换效率。

本文拟从理论上分析该 Blumlein 型微带光导开关电路的输出特性, 讨论它在不同激光功率激励下的工作特点, 并给出实验结果。

2 理论分析

图 2 如示的 Blumlein 型高效率微带光导开关电路设计为双层结构, 第一层微带线作为信

* 国家自然科学基金资助项目。

** 现工作单位为河海大学常州分校电子系, 213022。

收稿日期: 1995 年 12 月 11 日; 收到修改稿日期: 1996 年 1 月 22 日

号传输线,第二层微带线作为充电线,信号传输线和充电线均设计为 $50\ \Omega$ 阻抗,留有缝隙的半导体晶片串联在信号传输线和充电线之间,直流偏压加于第一层光导开关缝隙左端。当激光激励光导开关时,半导体将在瞬间产生大量的光生载流子,从而使开关导通, $50\ \Omega$ 的匹配负载 R_L 上有电压输出。

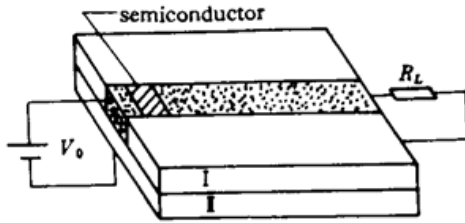


Fig. 2 The structure of Blumlein microstrip P. S.

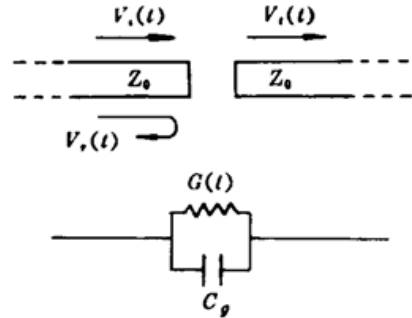


Fig. 3 The equivalent circuit of gap in P. S.

根据微波传输理论,微带中光导开关缝隙可用集总参数元件代替,因此,为了分析方便,并根据光导开关的结构和工作特点,我们用一个随时间变化的电导为 $G(t)$ 和一个与之并联的电容 C_g 来代替缝隙,如图 3 所示。这里,缝隙电容 C_g 的值约为 $20 \sim 50\ \text{fF}$, $G(t)$ 可表示为 $G(t) = G_0 + g(t)$,其中 G_0 是光导开关未受光照时存在的暗电导, $g(t)$ 是由于光生载流子而产生的电导,一般情况下, $g(t) \gg G_0$ 。

分析光导开关器件的工作情况可知,在微带中传输的是行波而不是驻波,因此,用入射电压、反射电压和透射电压的概念来分析电路是必要的。设入射、反射、透射电压分别为 $V_i(t)$, $V_r(t)$ 和 $V_t(t)$,则微带中流经的总电流为

$$I = \frac{V_i(t) - V_r(t)}{Z_0} \tag{1}$$

同时 $I = I_g + I_c$, I_g 为流经电导 $G(t)$ 的电流, I_c 为流经电容 C_g 的电流。显然, I_c 等于电容 C_g 上电量 $q(t)$ 的变化率,即

$$I_c = \frac{dq(t)}{dt} \tag{2}$$

而电容 C_g 上的电压 V_c 为:

$$V_c = q(t)/C_g \tag{3}$$

则

$$I_g = V_c G(t) = q(t)G(t)/C_g \tag{4}$$

根据(2), (3), (4) 式,直接应用电路定律,可得到关于 $q(t)$ 的方程:

$$\frac{V_i(t)}{Z_0} = \frac{dq(t)}{dt} + \frac{q(t)G(t)}{C_g} + \frac{q(t)}{2C_g Z_0} \tag{5}$$

分析(1)式和(5)式可知:

$$V_r(t) = \frac{q(t)}{2C_g} \tag{6}$$

则

$$V_t(t) = V_i(t) - V_r(t) = V_i(t) - q(t)/2C_g \tag{7}$$

进一步地,解方程(5)可得:

$$q(t) = \frac{1}{Z_0} \int_{-\infty}^t dt' V_i(t') \exp\left\{ \int_t^t \frac{1 + 2Z_0 G(t'')}{2Z_0 C_p} dt'' \right\} \quad (8)$$

将上式代入(7)式,并考虑到入射电压 $V_i(t)$ 即为光导开关直流偏置电压 V_0 ,可得到在负载 R_L 上的瞬时输出电压 $V_{out}(t)$ 为:

$$V_{out}(t) = V_i(t) = V_0 - \frac{1}{2Z_0 C_p} \int_{-\infty}^t dt' V_0 \exp\left\{ \int_t^t \frac{1 + 2Z_0 G(t'')}{2Z_0 C_p} dt'' \right\} \quad (9)$$

为了直观地分析光导开关的瞬时输出电压特性,我们假设 $G(t)$ 为理想的阶跃函数,即:

$$G(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ G_1, & t \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

将上式代入(9)式,并经计算可得

$$V_{out}(t) = V_0 \frac{2Z_0 G_1}{1 + 2Z_0 G_1} \left\{ 1 - \exp\left[- \left(\frac{1 + 2Z_0 G_1}{2Z_0 C_p} \right) t \right] \right\} \quad (11)$$

由于式中 G_1 是光电导,因此 G_1 的大小随激励激光的强弱而变。分析(11)式可知,当激励激光很弱,即 $Z_0 G_1 \ll 1$ 的情况下,光导开关的瞬时输出电压变为:

$$V_{out}(t) = 2V_0 Z_0 G_1 \left[1 - \exp\left(- \frac{t}{2Z_0 C_p} \right) \right] \quad (12)$$

此时,输出电脉冲的上升时间 $t_r = 2Z_0 C_p$,约为 ps 量级。当 $t \rightarrow \infty$,即在开关稳态下, $V_{out}(t) = 2V_0 Z_0 G_1 \ll V_0$,因此,在弱激光激励下,光导开关的输出电脉冲峰值很小,电压转换效率仅为 $2Z_0 G_1$,约 20% 左右,开关响应时间仅为 ps 量级。当激励激光很强,使得 $Z_0 G_1 \gg 1$ 时,光导开关工作在饱和状态,其瞬时输出电压变为:

$$V_{out}(t) = V_0 \left[1 - \exp\left(\frac{G_1 t}{C_p} \right) \right] \quad (13)$$

此时,输出电脉冲的上升时间 $t_r = C_p/G_1$,约为亚皮秒量级。当 $t \rightarrow \infty$,即稳态情况下, $V_{out}(t) = V_0$,因此,在强激光激励下,光导开关可以输出峰值为偏置电压值的电脉冲,电压转换效应达到了 100%,且开关响应时间具有亚皮秒量级,很适合于高压、大功率、宽频带电脉冲的产生。图 4 显示了在不同的激光功率激励下, G_1 不同时,输出电压的特性曲线。

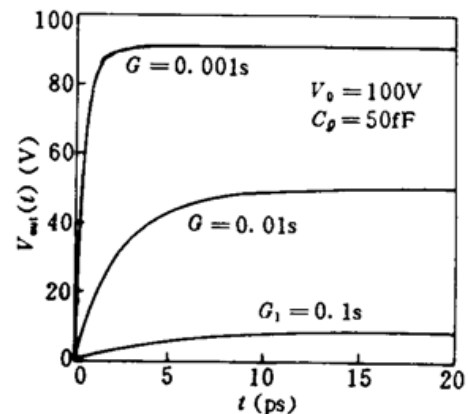


Fig. 4 The characteristic curves of output voltage in different G_1

上面我们分析了 $G(t)$ 为阶跃函数的理想情况,在实际的光导开关中,由于半导体材料载流子复合效应的存在, $G(t)$ 是一个时变函数。根据半导体光电子学理论,当激光激励光导材料时,

光生载流子可以在 fs 时间内产生,因此,光生载流子密度的上升跟随光脉冲的上升;而当激励光脉冲消失后,由于载流子的复合效应,光生载流子密度按指数规律迅速下降,即 $n(t) = n_0 \exp(-t/t_f)$,其中 t_f 为载流子复合寿命 ($< 1\text{ns}$)。由于 $G(t) \propto n(t)$,因此,时变电导 $G(t)$ 与光生载流子密度具有相同的变化规律。

为了得到一般情况下的输出电压变化规律,我们假设激励光脉冲为上升时间等于 t_r 的双

边指数脉冲,考虑到 $g(t) \gg G_0$,我们忽略暗电导 G_0 的影响,则 $G(t)$ 可近似表示为:

$$G(t) = \begin{cases} g_0 \exp(t/t_r), & t < 0 \\ g_0 \exp(-t/t_f), & t \geq 0 \end{cases} \quad (14)$$

将上式代入(9)式得:

$$t < 0 \text{ 时, } V_{out}(t) = V_0 - \frac{1}{2Z_0 C_g} \int_{-\infty}^t dt' V_0 \exp\left[\int_t^{t'} \frac{1 + 2Z_0 g_0 \exp(t''/t_r)}{2Z_0 C_g} dt'' \right] \quad (15)$$

$$t \geq 0 \text{ 时, } V_{out}(t) = V_0 - \frac{1}{2Z_0 C_g} \int_{-\infty}^t dt' V_0 \exp\left[\int_t^{t'} \frac{1 + 2Z_0 g_0 \exp(-t''/t_f)}{2Z_0 C_g} dt'' \right] \quad (16)$$

先考虑 $t < 0$ 的情况。由于 t_r 为 ps 量级,因此(15)式积分里的指数项 $g_0 \exp(-t/t_r)/C_g < i$ 。对指数项作级数展开,并取前两项可得:

$$V_{out}(t) = V_0 - \frac{V_0}{2Z_0 C_g} \int_{-\infty}^t dt' \exp\left(\frac{t' - t}{2Z_0 C_g}\right) \left[1 + \int_t^{t'} \frac{g_0}{C_g} \exp(t''/t_r) dt'' \right] \quad (17)$$

经计算得到输出电脉冲上升部分的表达式

$$V_{out}(t) = \frac{2Z_0 g_0 t_r V_0}{t_r + 2Z_0 C_g} \exp(t/t_r) \quad (18)$$

当 $t \geq 0$ 时,作同样的处理,可得到输出电脉冲下降部分的表示式

$$V_{out}(t) = \frac{2Z_0 g_0 t_f V_0}{t_f - 2Z_0 C_g} \exp(-t/t_f) \quad (19)$$

从而,考虑了光导材料的载流子复合效应以后,在上升时间为 t_r 的双边指数光脉冲激励下,光导开关的瞬时输出电压按下列规律变化:

$$V_{out}(t) = \begin{cases} \frac{2Z_0 g_0 t_r V_0}{t_r + 2Z_0 C_g} \exp(t/t_r), & t < 0 \\ \frac{2Z_0 g_0 t_f V_0}{t_f - 2Z_0 C_g} \exp(-t/t_f), & t \geq 0 \end{cases} \quad (20)$$

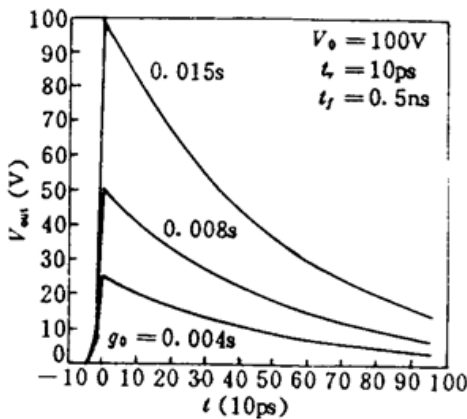


Fig. 5 The temporal varying curves of output voltage in various g_0

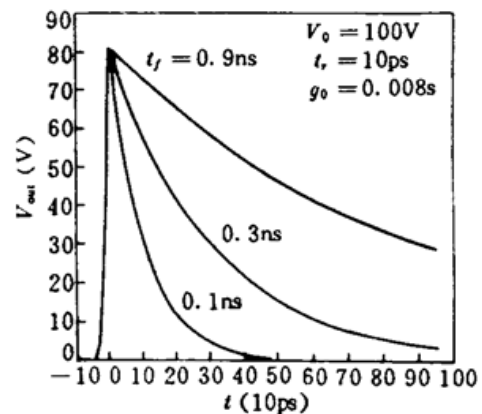


Fig. 6 The temporal varying curves of output voltage in various t_f

由上式可见,只要激光功率足够大,使光电导峰值接近于 $1/2Z_0$,则光导开关输出电脉冲峰值可达到偏置电压值 V_0 ,实现 100% 的电压转换效率。此外,光脉冲上升时间 t_r 和载流子复合寿命 t_f 分别决定了输出电脉冲的上升和下降时间。图 5 给出了激励上升时间 t_r , 载流子复合寿命 t_f

不变时,对于不同的光电导 g_0 ,即不同的激励光功率,光导开关输出电压的瞬时变化曲线。图 6 给出了激励光功率、光脉冲上升时间不变时,对于不同的载流子复合寿命,光导开关输出电压的瞬时变化曲线。

3 实验结果

我们分别对图 1 和图 2 所示的两种光导开关器件在同样的实验条件和参数设计下进行了比较实验。实验系统由激励光源、偏置电源、光导开关、取样示波器和微机构成。激励光源采用 $1.06 \mu\text{m}$ Nd:YAG 被动锁模激光器,其输出光脉冲经倍频并选单脉冲后激励光导开关,光脉冲宽度 $< 20 \text{ ps}$,能量约 0.3 mJ ;光导材料采用 Cr:GaAs,其暗电导率约 $10^{-8} (1/\Omega \cdot \text{cm})$,载流子复合寿命 $< 1 \text{ ns}$;开关缝隙长度取为 1 mm ,缝隙宽度取为 3 mm ,偏压 3.6 V ;开关输出电脉冲经 10.5 dB 衰减器后,输入到 SQ-27 取样示波器和微机组成的监测系统,进行记录和测量。实验结果如图 7 和图 8 所示。

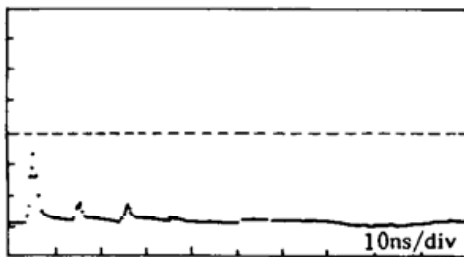


Fig. 7 The output electrical pulse of the Auston photoconductive switching

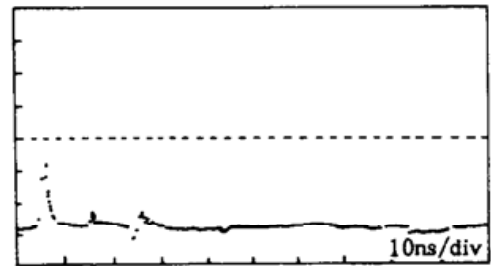


Fig. 8 The output electrical pulse of the Blumlein photoconductive switching

由图 7 和图 8 可知,Auston 型光导开关的电压转换效率仅为 42% ,而本文介绍的 Blumlein 型高效微带光导开关的电压转换效率达到了 93% ,充分证实了它的高效电压转换特性,且与理论分析结果十分吻合。

4 结 论

根据理论分析和实验结果,我们得到如下结论:

(1) 本文提出的 Blumlein 型高效率微带光导开关电路具有 100% 的电压转换效率,因此它是应用于高压、大功率电脉冲产生技术的有效器件。

(2) 光导开关输出电脉冲的上升时间基本由光脉冲的上升时间决定,而下降时间则由载流子复合寿命决定。

(3) 为了使光导开关实现电压的高效率转换,应采用强激光激励,使光导开关工作在饱和状态,即使 $Z_0 G \gg 1$ 。

参 考 文 献

- 1 D. H. Auston. Picosecond optoelectronic switching and gating in silicon. *Appl. Phys. Lett.*, 1975, 26(3): 101~103
- 2 C. H. Lee. Picosecond optics and microwave technology. *IEEE Tran. MTT*, 1990, 38(5): 596~607
- 3 A. P. DeFonzo, C. R. Lntz. Optoelectronic transmission and reception of ultrashort electrical pulses. *Appl. Phys.*

Lett., 1987, 51(4): 212~214

- 4 R. Heidemann, T. Pfiffer, D. Jager. Optoelectronically pulsed slot-line antennas. *Electr. Lett.*, 1983, 19: 316~320

Research on Blumlein Microstrip Photoconductor Switching with High-efficiency

Bao Jilong Xu Changcun Shi Shunxiang Guo Siji
(Department of Technique Physics, Xidian University, Xi'an 710071)

Abstract A Blumlein microstrip photoconductor switch (P. S.) of high-efficiency is described for the first time in this paper. The output characteristics of the P. S. circuit and the working properties of the P. S. driven by various laser powers are discussed in theory. Theoretical analysis shows that the P. S. has 100% voltage transmission efficiency. Voltage transmission efficiency of 93% has been obtained in experiment that in agreement with the result of theory.

Key words photoconductor switching, ultrashort optical pulse, ultrashort electric pulse, voltage transmission efficiency