# 光导开关产生的非线性电脉冲的传输特性

刘 鸿 , 阮成礼 , 吴明和

(电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

【摘要】针对光导开关产生的非线性电脉冲进行合理化近似并建立数学模型。对非线性电脉冲的不同波形的 传输特性进行了理论推导和数值求解,与中心频率相同的矩形脉冲和梯形脉冲的传输特性进行了比较。结果表明: 上升沿愈陡,直线段愈水平时,非线性电脉冲与矩形脉冲的传输特性愈趋近。该结论为非线性光导开关在传输领 域内的广泛应用提供了理论依据。

关键词 非线性电脉冲;数学模型;物理原理;数值求解中图分类号 TN015; O441.1文献标识码 A

## Research of Transmission Characteristics of Nonlinear Electric Pulse Generated by PCSS's

Liu Hong, Ruan Chengli, Wu Minghe

(School of Physical Electronics, UEST of China Chengdu 610054)

**Abstract** Maths model of nonlinear electric pulse generated by PCSS's is built. Transmission Characteristics of various waveforms of it are deduced theoretically and analysised numerically. Compared with rectangle and isosceles trapezoid electric pulses, it is indicated that transmission Characteristics of Nonlinear Electric Pulse is more closer to that of rectangle pulse, when the risetime is shorter and the beeline is more horizontal. Theoretical basis is provided for applications of nonlinear photoconductive switches in the transmission of electromagnetic energy.

Key words nonlinear electric pulse; maths model; physical principle; numerical analysis

光控光导半导体开关(Photoconductive Semiconductor Switches, PCSS's)由于具有许多优良特性,从1975 年Auston提出光导开关技术以来一直受到了广泛重视和研究<sup>[1]</sup>,并在许多领域得到了广泛的应用。光导开关 的非线性特性在高功率超宽带脉冲(电磁导弹)产生领域<sup>[2]</sup>,超快电子学,高功率微波发生器,高功率微波武 器,雷达和通信中有极为广阔的应用前景和重大意义。对此进行了一系列的理论和实验研究,并取得了很 大进展。但尚未见到对光导开关产生的非线性电脉冲传输特性的研究进行专门报导。本文在对非线性光导 开关进行大量实验研究结果分析的基础上,对普通型微带线光导开关工作于非线性模式的输出电脉冲进行 合理化近似,建立数学模型;对非线性电脉冲的传输特性进行了理论探讨。

1 光导开关产生的非线性电脉冲的数学模型

大量实验研究表明<sup>[3-5]</sup>,光导开关产生的非线性电脉冲大致可分为三个阶段:1)是从零上升到第一个 尖脉冲的最大值,即上升阶段,该阶段电脉冲的时间分布取为高斯型,如图1所示;2)抖动缓降用一条斜率 为负的直线近似;3)为指数衰减<sup>[6]</sup>。得到非线性电脉冲的数学模型为

收稿日期:2003-10-24

基金项目:国防科研基金资助项目

作者简介:刘 鸿(1961-),男,在职博士生,讲师,主要从事电磁场与微波技术方面的研究.

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t & 0 \\ E_0 \exp\left[-\left(\frac{t-t_1}{a_1}\right)^2\right] & 0 < t & t_1 \\ E_0[1-a_2(t-t_1)] & t_1 & t_2 \\ E_0[1-a_2(t_2-t_1)]e^{-a_3(t-t_2)} & t & t_2 \end{cases}$$
(1)

式中  $E_0=f(t_1)$ 为电脉冲的最大值。 $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ 为相应函数段的调整因子: $a_1$ 决定电脉冲上升沿的陡缓状况;  $a_2$ 为第二阶段倾斜衰减状况; $a_3$ 为下降沿指数衰减状况。令电脉冲中心频率对应的周期为 $T_1=t_3-t_0=70$  ps。根据实验结果分析确定拟和因子 $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ 的取值范围分别为

$$a_1 \in [1 \times 10^{-12}, 9 \times 10^{-12}]$$
,  $a_2 \in [0 \times 10^9, 5 \times 10^9]$ ,  $a_3 \in [2 \times 10^{10}, 9 \times 10^{10}]$  (2)



#### 2 非线性电脉冲传输特性研究的物理原理

为理论分析方便,取如图2所示的圆形单元辐射器,其半径为*a*。设辐射器中有沿*x*方向的由光导开关产 生的非线性电脉冲,时变电流密度向量为

$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{x}',\boldsymbol{y}',\boldsymbol{z}',t) = \begin{cases} 0 & \boldsymbol{r}' & a \\ \boldsymbol{e}_{\boldsymbol{x}}\boldsymbol{d}(\boldsymbol{z}')f(t) & \boldsymbol{r}' & a \end{cases}$$
(3)

对式(3)作傅里叶变换

$$\boldsymbol{J}(x',y',z',w) = \begin{cases} 0 & \boldsymbol{r}' > a \\ \boldsymbol{e}_{x}\boldsymbol{d}(z')F(w) & \boldsymbol{r}' & a \end{cases}$$
(4)

式中

$$J(x', y', z', w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} J(x', y', z', t) e^{iwt} dt$$
(5)

$$F(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \mathrm{e}^{\mathrm{i}wt} \mathrm{d}t$$
(6)

由Maxwell方程组给出的电磁场的波动方程为

$$\nabla^2 A - m e \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -m J \tag{7}$$

其频域形式解为

$$A(\mathbf{r}', w) = \frac{\mathbf{m}}{4\pi} \int_{V'} \frac{J(\mathbf{r}', w)}{r} e^{-ikr} dv'$$
(8)

沿圆盘轴线非零电磁场分量的频域表达式为

$$E_{x} = \frac{i}{wme} \left[ \frac{\partial^{2} A_{x}}{\partial y^{2}} + \frac{\partial^{2} A_{x}}{\partial z^{2}} \right]$$
(9)

$$H_{y} = \frac{1}{\mathbf{m}} \frac{\partial A_{x}}{\partial z} \tag{10}$$

由式(3)、(8~10)得

$$E_x = \frac{\mathbf{h}}{2} F(\mathbf{w}) [g_2(z) \mathrm{e}^{-\mathrm{i}kR} - \mathrm{e}^{-\mathrm{i}kz}] + \mathrm{i} \frac{\mathbf{h}a^2}{4kR^3} F(\mathbf{w}) \mathrm{e}^{-\mathrm{i}kR}$$
(11)

$$H_{y} = \frac{1}{2} F(\mathbf{w}) \Big[ g_{1}(z) e^{-ikR} - e^{-ikz} \Big]$$
(12)

式中

264

$$R = \sqrt{a^2 + z^2} \tag{13}$$

波阻抗为

$$\boldsymbol{h} = \sqrt{\frac{\boldsymbol{m}}{\boldsymbol{e}}} \tag{14}$$

$$g_1(z) = \frac{z}{\sqrt{a^2 + z^2}}$$
(15)

$$g_{2}(z) = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{z^{2}}{a^{2} + z^{2}} \right)$$
(16)

对应电磁场分量的时域表达式为

$$E_{x} = \frac{h}{2} \left[ g_{2}(z) f\left(t - \frac{R}{c}\right) - f\left(t - \frac{z}{c}\right) \right] - \frac{a^{2}}{4eR^{3}} \int_{-\infty}^{t} f\left(t - \frac{R}{c}\right) dt$$
(17)

$$H_{y} = \frac{1}{2} \left[ g_{1}(z) f\left(t - \frac{R}{c}\right) - f\left(t - \frac{z}{c}\right) \right]$$
(18)

坡印亭矢量时间积分为

$$\boldsymbol{G} = \int_{-\infty}^{+\infty} \boldsymbol{E} \times \boldsymbol{H} \mathrm{d}t \tag{19}$$

由式(17~19)得到在圆盘轴线坡印亭矢量时间积分解析解,忽略最后一项为

$$G = \frac{\mathbf{m}}{4} \int_{-\infty}^{+\infty} [1 + g_1(z)g_2(z)] f^2(t) dt - \frac{\mathbf{h}}{4} \int_{-\infty}^{+\infty} [g_1(z) + g_2(z)] f(t) f(t - \mathbf{x}) dt$$
(20)

式中

$$\mathbf{x} = \frac{R-z}{c} \tag{21}$$

### 3 数值求解及分析

由于高斯函数的积分无法作出,将高斯函数作级数展开后积分又存在截断问题,故将式(1)代入式(20) 的解析解无法作出,本文作出其数值解,并与中心频率相同的矩形脉冲和梯形脉冲的传输特性进行比较, 如图3~5所示,分析如下:

1) 由图3可见,固定 $a_2=5\times10^9$ /s, $a_3=9\times10^{10}$ /s时, $a_1$ 取值愈小,即上升沿愈陡的非线性电脉冲的传输特性愈优。 $a_2,a_3$ 取的分别是两个极端值。此时 $a_1$ 取值愈小的非线性电脉冲与梯形脉冲的传输特性曲线愈靠近;



2) 图4是当固定 $a_1 = 1 \times 10^{-12}$ /s,  $a_3 = 2 \times 10^{10}$ /s取值时,  $a_2$ 取不同 值的传输特性图。a2愈小,即直线段愈水平,传输特性愈好。a1,a3 分别取的极端值。图中表明:非线性电脉冲的传输特性接近于最 优的矩形脉冲传输特性;

3) 图5表明: a1=2×10<sup>-12</sup>/s, a2=2×10<sup>9</sup>/s取定值后, a3取值愈大, 即下降沿愈陡时,非线性电脉冲的传输特性愈好,愈接近于最优 的矩形脉冲传输特性。

综合总结如下:1)非线性电脉冲的传输特性优劣程度的影响 因素,重要性顺序为:(1) 上升沿要陡 $(a_1$ 要小);(2) 直线段要水  $\Psi(a_2$ 要小); (3) 下降沿要陡( $a_3$ 要大)。综合图3~5, 决定因素是

图5 a3变化时的传输曲线 a1,a2。关于光导开关的大量实验研究表明,利用其非线性工作模式的延迟和大增益特性,获得低a1值的电脉 冲是现实的。2) 由图3~5可知,光导开关产生的非线性电脉冲存在慢衰减,特别是a<sub>1</sub>,a<sub>2</sub>取值愈小时,非线 性电脉冲保持在慢衰减的区域愈长,愈接近于矩形脉冲的情况。

 $\odot T_0 = t_2 - t_1$ ,则非线性电脉冲保持在慢衰减区(G随z的衰减满足G \circ z^{-2d}, D < d < 1)的条件为

$$\frac{a^2 - c^2 T_0^2}{2c T_0} \quad z \quad \frac{a^2 - c^2 (t_0 + a_1)^2}{2c (t_0 + a_1)} \tag{22}$$

由式(22)可见a1愈小,则z愈大,即慢衰减区域延伸愈远。

#### 结 论 5

由以上分析可得如下结论:1)光导开关在一定阀值的偏置电压下产生的非线性电脉冲能够用数学模型 来合理化近似;2) 光导开关产生的非线性电脉冲的传输特性由上升沿和近似直线段的水平程度决定,上升 沿愈陡(a1愈小),近似直线段愈水平(a2愈小,甚至a2趋于0),则非线性电脉冲的传输特性愈好;3)光导开关 是电磁导弹的现实有效产生源。

本文研究工作得到电子科技大学青年基金(No.JX03019)资助,在此表示感谢。

#### 文 献

- [1] Auston D H. Picosecond optoelectronic switching and gating in silicon[J]. Appl Phys Lett, 1975, 26(3): 101-103
- [2] 阮成礼, 万长华. 电磁导弹的波形条件[J]. 科学通报, 1990, 36(10): 738-741
- [3] 石顺祥, 孙艳玲, 赵 卫. 非线性光导开关的实验研究[J]. 光子学报, 1998, 27(2): 1 078-1 082
- [4] 张同意, 石顺祥, 赵 卫, 等. 高效率微带线光导开关非线性特性的实验研究[J]. 光子学报, 2000, 29(3): 209-212
- [5] 龚仁喜, 张义门, 石顺祥, 等. 高压GaAs光导开关的锁定及延迟效应机理分析[J]. 光学学报, 2001, 21(11): 1 372-1 376
- [6] 阮成礼. 有耗媒质中的瞬态电磁波[J]. 电波科学学报, 1993, 8(4): 1-7
- [7] Wen Keyi, Ruan Chengli, Lin Weigan. An unified theory of electromagnetic missiles generated by an arbitrary plane current source[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 1992, 5(7): 337-340
- [8] 杨宏春, 阮成礼, 裴 俊. 正弦脉冲与等腰梯形脉冲传播特性的比较[J]. 电子科技大学学报, 2001, 30(6): 571-575

0.0 -1.0(02) g(G)-2.0-3.0 -4.04.0 4.5 0.0 1.0 2.0 3.0 lgz

辑

缊

孙晓丹