

基于静态场的光导开关 Blumlein 线传输特性的 FDTD 分析研究

朱言午 石顺祥 孙艳玲 刘继芳
(西安电子科技大学技术物理学院 西安 710071)

摘要: 该文利用电磁场时域有限差分研究了恒定电压下光导开关 Blumlein 线电脉冲的传输特性。首先用达朗伯公式行波法分析了 Blumlein 线的工作原理, 针对具体工作情况的要求, 分别提出了电磁场时域有限差分下处理边界条件的方法和源的预置方法, 针对光导开关提出了表面阻抗模型。计算给出了处于恒定电压下的光导开关 Blumlein 电脉冲产生和传输的过程, 给出了电脉冲的时间分布。实验结果证明了所进行的电磁场时域有限差分分析结果是正确的。最后进一步分析了 Blumlein 线输出电压与结构的关系。

关键词: 光导开关; 表面阻抗; FDTD; Blumlein 线; 达朗伯公式

中图分类号: TN202

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)01-0250-03

FDTD Analysis of Pulse Propagation on Blumlein Line Produced by Photo-Conductive Switches Applied Bias Voltage

Zhu Yan-wu Shi Shun-xiang Sun Yan-ling Liu Ji-fang
(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The characteristics of electromagnetic pulse produced by Photo-Conductive switches and Blumlein line under the bias voltage is studied by FDTD. The D'Alemberts formula is used to analyze the principle of Blumlein line. A total reflection border and the source method are given for the situation that Blumlein line worked under bias voltage. The SIBC is used to model the PCSs. The propagation of pulse is computed. The waveform of different time is given. The experiment result agrees with the numerical result well. The relation between geometry and output voltage of Blumlein line is studied.

Key words: Photo-Conductive Switches(PCSs); Surface impedance boundary condition(SIBC); FDTD; Blumlein line; D'Alemberts formula

1 引言

超宽带辐射可以提供高的成像分辨率和好的目标特性, 在精密测量、超宽带雷达等领域内得到广泛应用, 所以其成为了研究热点。利用 Blumlein 线和光导开关(PCSs)构成的组件可以产生超短电压脉冲, 并可用于超宽带天线辐射。文献[1]研究了基于该组件的天线辐射系统, 从试验上验证了用光导开关做为源的 TEM 辐射天线系统; 文献[2]给出了一种基于光导开关的可重构天线; 文献[3]研究了光导开关用于采样和自校准的电路; 文献[4]研究了增强光导开关寿命的方法; 文献[5]把光导开关等效为电阻电容利用 PSPICE 进行了研究。随着电磁场时域有限差分(FDTD)理论^[6]的广泛应用, 人们利用 FDTD 对光导开关也开展了很多理论研究: 文献[7]重点是如何在 FDTD 公式包含载流子产生和湮灭的麦克斯韦方程式并划分了不同的网格, 尽管人们对光导开关器件及其应用已开展了许多深入的研究工作, 但就作者所知, 至今还没有针对基于恒定电压的光导开关 Blumlein 线输出特性的 FDTD 分析的报道。本文根据达朗伯公式行波法^[8]分析了光

导开关 Blumlein 传输线的原理, 利用 FDTD 研究了处于恒定电压下的光导开关 Blumlein 线脉冲产生及传输, 精确地描述出了脉冲在微带线中的传输过程, 其结果与实验一致。本文的研究工作为进一步研究利用光导开关的超宽带辐射研究打下基础。同时应当指出, 本文对静态场及光导开关的处理方法也适用于其它类似问题。

2 Blumlein 线理论分析

2.1 电路原理

首先对图 1(a)所示由光导开关(PCSs)和 Blumlein 线构成的组件利用长线理论进行分析。图 1(b)给出了它的等效长线图。其基本工作原理如下: 用一个内阻很大的恒定电压源将传输线充电至 V_0 , $t=0_-$ 将开关打开, 在 $z=L$ 处产生了一个后向波 $V_- = -V_0$ 。

在 $t=L/v$, V_- 到达在 $z=0$ 的负载 $R_L=2Z_0$, 在 $z=0_+$ 处产生了一个反射波 V'_+ , 边界条件要求 $z=0_+$ 处 $V'_+ = -V_0/2$ 。在 $z=0_-$, 产生了 V'_- 。根据 KVL, $V'_- = -V_0/2$ 。

在 $t=2L/v$, V'_- 在 $z=-L$ 产生了 V''_+ , 由于反射系数 $\Gamma=1$, 使得 $V''_+ = V''_- = -V_0/2$ 。 V''_+ 在 $z=L$ 产生 V''_- 。由于有反射系数 $\Gamma=-1$ 。使得 $V''_- = -V''_+ = V_0/2$ 。

在 $t=3L/v$, V''_+ 和 V''_- 到达 $z=0$ 处的负载, 使得 $V_L=0$ 。

2007-08-28 收到, 2008-02-06 改回

国家部委级基金和陕西省自然科学基金(2006F31)资助课题

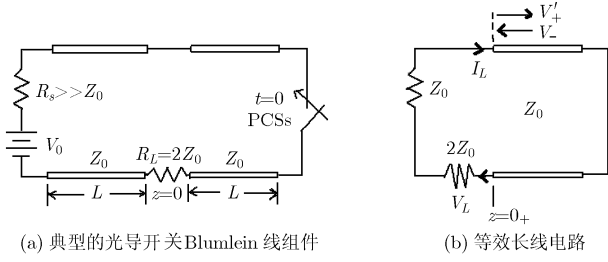


图 1

新产生的 $V_+'' = V_-'' = V_0/4$, 由于 $z = -L$ 和 $z = L$ 处反射系数刚好相反, 使得后来 $V_L = 0$ 。因此从 $t = L/v$ 到 $t = 3L/v$ 时刻 $V_L = V_0$ 。Blumlein 线的优点是输出电压幅度为 V_0 而不是普通微带线产生的 $V_0/2$ 。

2.2 达朗伯公式行波法

上述过程可以也是波在一端自由另一端固定且包含跃变点的有限空间中的传导问题, 所以可通过求解其满足的波动方程讨论。

在考虑一维情况, 没有激励源的齐次波动方程为

$$u_{tt} - a^2 u_{xx} = 0 \quad (1)$$

初始条件和边界条件为

$$u|_{t=0} = \Phi(x) \quad (2)$$

$$u_t|_{t=0} = \psi(x) \quad (3)$$

$$u_x|_{x=-l} = 0 \quad (4)$$

$$u|_{x=l} = 0 \quad (5)$$

即 $x = l$ 处为固定端, $x = -l$ 处为自由端, $x = 0$ 处为跃变点。其中

$$\Phi(x) = \begin{cases} V_0, & -l < x \leq l \\ 0, & x > l \text{ \& } x < -l \end{cases}, \quad \psi(x) = 0 \quad (6)$$

把上述方程的解分为左行波和右行波, 左行波边界条件为式(3), 其电压波为

$$u^-(x, t) = \frac{1}{2} [\Phi(-x - 2l + at) + \Phi(x + at)], \quad t \leq \frac{3l}{a}, \quad -l < x < l \quad (7)$$

右行波边界条件为式(4), 电压波为

$$u^+(x, t) = \frac{1}{2} [\Phi(-x + 2l - at) + \Phi(x - at)], \quad t \leq \frac{3l}{a}, \quad -l < x < l \quad (8)$$

在 $z = 0$ 处, 其电压波值为 $[u^-(0, t)/Z_0 - u^+(0, t)/Z_0] \cdot 2Z_0$ 。

波动方程可以用有限差分方法分析, 本文针对上述具体问题用时域有限差分方法分析电磁波在 Blumlein 线中的传输。

3 光导开关

光导开关基本过程: 在没有光照的情况下, 由于光导材料的电导率很低, 通过开关的电流很小, 开关基本上处于阻断状态。而当激光照射到光导材料上的时候, 会在极短的时

间内在光导材料体内产生大量的电子-空穴对, 使 PCSs 的电导率骤然升高。开关很快从阻断状态转换为导通状态, 这一转换过程可以在皮秒甚至亚皮秒量级的时间内完成。因此, 响应速度是相当快的。当光脉冲熄灭后, 由于载流子的复合, 光导开关将恢复到原阻断状态, 这就是光导开关的基本工作原理。

当光导开关和 Blumlein 线一起工作时, 由于光导开关在导通过程中及导通后电导率要小于 Blumlein 线金属层的电导率, 所以 Blumlein 线中金属层可以看作是理想导体, 而导通后的光导开关可以看成是良导体, 波在 Blumlein 线中传播可以看作理想状况下 TEM 波沿着由两块理想导体组成的导波装置向 z 方向传播, 电场主要是 E_y 分量, 垂直于导体表面, 磁场主要是 H_x 分量, 平行于导体, 当遇到光导开关的时候, 导波边界的理想导体变为了良导体, 情况就发生变化, 主要是一个切向向量 E_z 的引入, 切向分量由磁场的切向分量和阻抗来决定的。

切向分量 E_z 表达式为

$$E_z = J_z Z_s = -H_x Z_s \quad (9)$$

表面阻抗为

$$Z_s = \sqrt{j\omega\mu/\sigma} \quad (10)$$

将式(8)拉普拉斯变换, 得到了表面阻抗的时域公式(10), 再将式(10)时间空间离散化转化为 FDTD 的计算公式, 就得到了表面阻抗的 FDTD 计算公式。

$$E_z(t) = Z_s'(t) \otimes \left[\frac{\partial}{\partial t} H_x(t) \right] = \int_0^t \sqrt{\frac{\mu}{\sigma(\tau)\tau}} \left[\frac{\partial}{\partial t} H_x(\tau) \right] d\tau \quad (11)$$

4 数值计算

实际应用中, 通常采用图 2 所示的平行板 Blumlein 结构。本文对图 2 所示电路结构进行了 FDTD 计算, 吸收边界条件采用了 8 层 PML 吸收边界。在计算中, Blumlein 线的初始条件可以采用不同的方法建立, 本文采用首先在同样结构无限长 Blumlein 线上加正弦源, 当此 Blumlein 线上电压稳定后取某一个截面上电场分布作为标准场分布, 然后将此场分布加在放置有光导开关的 Blumlein 线上, 加得长度范围为 $z = 0$ 到 $z = L_1$ 这一段, 这符合在 Blumlein 线上加了电场但光导开关没有打开时 Blumlein 线上的实际情况, 只有电场, 没有磁场, 满足波动方程中的初始条件式(5)。光导开关则采用表面阻抗模型。

为了清楚, 通常把 Blumlein 线划分为 3 个区, 分别是 I 区, 对应线的上部, 边界条件为自由端, 反射系数为 -1, 满足条件式(3); II 区, 对应线的下半部, 边界条件为固定端,

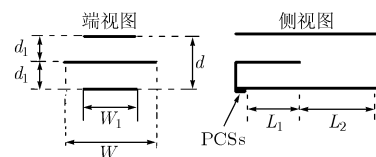


图 2 Blumlein 线结构示意图

反射系数为1, 满足条件式(4); III区, 对应线的整体。 L_1 和 L_2 的接合处是跃变点。

本文研究了 Blumlein 线在 L_1 为 50mm, L_2 为 150mm 时波的传播。计算结果如图 3(a),3(b),3(c): 当光导开关打开时, II区波开始传播, 由于 II区边界为自由端, 所以向 z 正向传播的波为 $-V_0/2$ 。从 $t=0$ 到 $t=L_1/v$, I区的波保持不变。 $t=L_1/v$ 时刻, II区的波前抵达 $z=L_1$ 处, 平衡被打破, I区的波分裂为两个幅度为 $V/2$ 的波形向相反方向开始传播, 向 z 正方向的波和 II区的波形成幅度为 V_0 的波, 从 $t=3L_1/v$ 起, I区的波和 II区的波开始抵消, 从而形成了幅度为 V_0 脉宽为 $2L_1/v$ 的脉冲。

我们利用图 2 所示的组件进行了实验, 测量了 Blumlein 线光导开关的电脉冲输出, 实验结果如图 3(d)。可以看出, 实验波形与计算波形非常吻合, 说明我们利用 FDTD 对光导开关微带线产生电脉冲的处理是正确的。

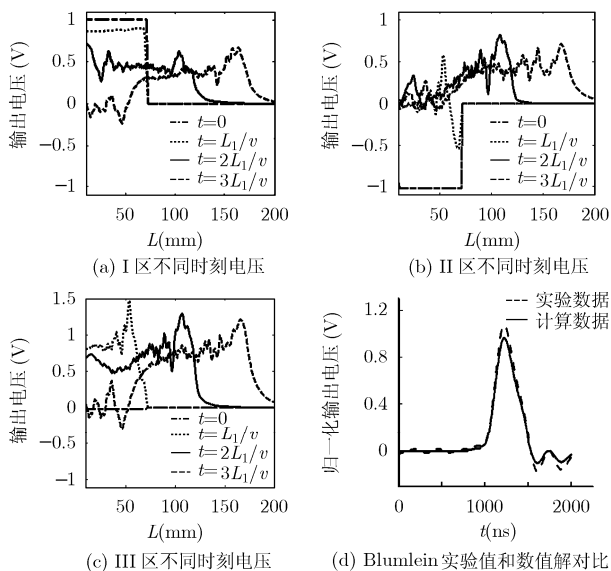


图3 Blumlein 线电压波形图

从图 3(a)中可以看出, 当 II区波传播的时候, I区波的幅度开始下降, 这是由于电磁波的耦合, 不同区域内的电磁波互相影响。影响它们之间耦合强度的主要因素是中间导体的宽度 W , 中间导体越宽, 屏蔽作用越明显, 耦合强度越低。同时, 板高 d 和板宽 W 的比值也影响输出电压, 他们比值越小, 输出电压就越靠近理论值。我们计算了不同宽度中间导体和不同板高与板宽比值的输出电压。如图 4, 可以看出, 当 W/W_1 大于 3 之后, 输出电压不再增加, 同时, 随着 W/d 的增大, 输出电压也在不断增加。

5 结束语

本文用 FDTD 研究了恒定电压下 Blumlein 线光导开关电脉冲的输出特性, 不同于以往文献的分析, 本文针对恒定电压工作情况的要求, 提出了计及恒定电压处理全反射边界条件以及源的处理方法。利用光导开关的 SIBC 模型用 FDTD 方法详细计算给出了处于恒定电压下的光导开关

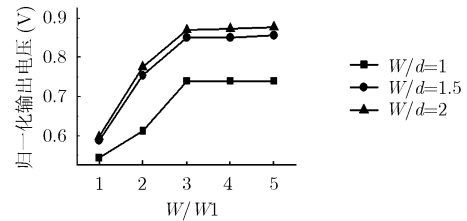


图4 不同中间导体宽度和不同宽度与高度比值的输出

Blumlein 线电脉冲产生和传输的过程, 分析了输出和几何结构的关系。实验结果与 FDTD 分析结果吻合, 说明本文方法是切实可行的, 为进一步分析基于光导开关 Blumlein 线的天线打下基础。同时, 这种方法也可以在类似的环境中使用。

参考文献

- [1] Schoenberg Jon S H. Ultra-wideband source using gallium arsenide photoconductive semiconductor switches. *IEEE Trans.on Plasma Science*, 1997, 25(2): 327-333.
- [2] Panagamuwa Chinthana J. Frequency and beam reconfigurable antenna using photoconducting switches. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2006, 54(2): 449-454.
- [3] Lydie Armengaud. Electromagnetic analysis of optoelectronic devices applied to the study of a sampler and an autocorrelator, *IEEE Trans. on Microwave theory and Techniques*, 1996, 44(7):1017-1022
- [4] Davanloo F, Collins C B, and Agee F J. High-power photoconductive semiconductor switches treated with amorphous diamond coatings. *IEEE Trans. on Plasma Science*, 2002, 30(5): 1897-1904.
- [5] 龚仁喜, 张义门, 石顺祥. 用PSPICE模拟光导半导体开关的瞬态特性. *西安电子科技大学学报*, 2002, 29(1): 87-91.
Gong Ren-xi, Zhang Yi-men, and Shi Shun-xiang. Simulation of the transient response of photoconductive semiconductor switches by PSPICE. *Journal of Xidian University*, 2002, 29(1): 87-91
- [6] 葛德彪. 电磁波时域有限差分方法. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.
Ge D B. Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetic Waves. Xi'an: Xidian University Press, 2002.
- [7] Marina Sirbu. Coupling 3-D Maxwell's and Boltzmann's equations for analyzing a terahertz Photoconductive Switch. *IEEE Trans. on Microwave theory and Techniques*, 2005, 53(9): 2991-2998.
- [8] 梁昆森. 数学物理方法. 北京: 人民教育出版社, 1978: 189-196.
Liang K M. Mathematics and Physics Method. Beijing: People's Education Press, 1978: 189-196.

- 朱言午: 男, 1973年生, 博士生, 研究方向为时域电磁场计算和光电器件。
石顺祥: 男, 1946年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为光电子技术、非线性光学。
孙艳玲: 女, 1971年生, 博士生, 讲师, 研究方向为光电子技术与超短光脉冲技术。
刘继芳: 男, 1957年生, 教授, 研究方向为非线性光学、光信息处理。