

文章编号: 1001-4322(2007)03-0521-03

激振线超快脉冲产生机理和模型*

陈宇晓, 张 扬, 唐 丹

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 根据脉冲波前压缩原理, 建立了激振线电路模型, 推导出脉冲前沿压缩计算公式。激振线是一个近连续线的高阻抗微带传输线, 反偏压的变容二极管以相同的小间隔加载到传输线, 输入激励是一个下降沿的负脉冲。随着输入脉冲在传输线上的传播, 变容二极管的电容随反偏压增大而减小, 导致每个节点传播延迟的变化, 从而压缩脉冲波前, 产生前沿可达 1 ps 的超快脉冲。

关键词: 超快脉冲产生; 激振线; 变容二极管; 脉冲传输线; 波前压缩

中图分类号: TN789.1 文献标识码: A

在高能物理、激光聚变、爆轰力学、核物理实验中, 涉及到许多 ps 级单次事件^[1], 因此具有 ps 级上升沿超快脉冲的产生和取样方法成为一个重要研究方向, 由此兴起一门新的电子学科——皮秒电子学。目前基于 GaAs, AlGaAs, GaInAs 和 InP 材料制作的晶体管截止频率已经达到 350 GHz^[2], 并且利用这些晶体管制作出的 100 GHz 毫米波单片集成电路早已有报道^[3], 利用这些超高速集成器件和皮秒脉冲传输线可以实现超快电子脉冲产生^[4,5]。自 1966 年以来, 就开始使用阶跃恢复二极管(SRD)来产生快脉冲^[6], 目前典型 SRD 的上升沿在 100 ps 量级。根据脉冲波前压缩原理, 使用微带传输线和超快变容二极管构成的激振线, 考虑到电路连接和工艺因素, 可以产生 10~50 ps 前沿的超快脉冲。基于同一机理, 利用先进集成电路工艺, 在 GaAs 基片材料上直接制作非线性传输线和肖特基接触, 理论上可以获得前沿小于 1 ps 的超快电子脉冲^[7]。本文从建立传输线和变容二极管模型入手, 分析激振线快脉冲产生机理, 推导出激振线电路模型的计算公式。

1 传输线模型

激振线电路一般由多级的振荡线构成, 每一级振荡线包括一段传输线(见图 1)和反向偏置的超快变容二极管。根据微带传输线理论, 当电路工作频率超过 1 GHz 时, 就进入厘米波范围, 波长与分立电路元件的几何尺寸可相比拟, 电压和电流不再保持空间不变, 集总电路分析的假设已经不成立, 基尔霍夫电压定律(KVL)和电流定律(KCL)不能直接利用。如图 1 所示, 如果传输线节 l 非常小, 在该线节上集总电路假设成立, 电压和电流保持恒定, 因此仍然可以利用 KVL 和 KCL 进行设计和分析。同时由于线节 l 非常小, 传输线的损耗不会引起可观的误差, 因此在线节 l 上无损传输线条件成立, 即 $R = G = 0$ (见图 1(d))。假定该线节长度为 l , 特性阻抗 Z_0 , 线节电感 L , 线节电容 C_l , 相速 v_p , 时间延迟间隔 τ , 则有

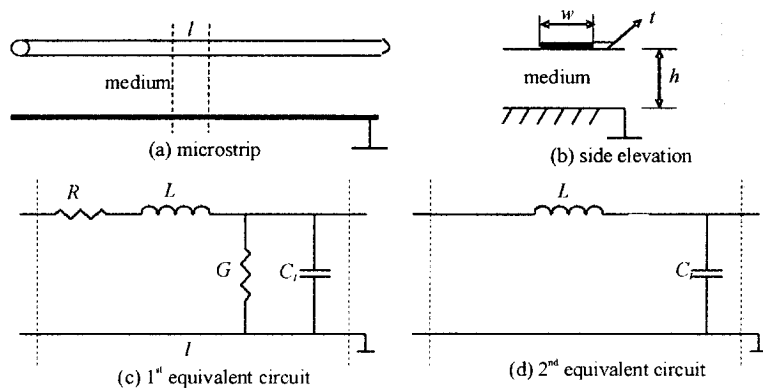


Fig. 1 Model of transmission line

图 1 传输线模型

* 收稿日期 2006-12-28; 修订日期 2007-03-06
基金项目: 中国工程物理研究院基金资助课题
作者简介: 陈宇晓(1972—), 男, 博士, 副研究员, 从事快电子学和军备控制技术研究, cyx905@21cn.com。

$$L = Z_l \tau, \quad C_l = \tau / Z_l, \quad \tau = l / v_p \quad (1)$$

2 变容二极管模型

变容二极管是一种具有(超)突变结的半导体二极管,一般用于实现微波电路的频率调谐,也用于产生超快短脉冲。其等效电路模型如图 2 所示,一般二极管结电阻 R_j 的阻值很高(几十 $M\Omega$),可忽略不计,因此有图 2(b)等效电路,二极管模型可近似为串联电阻 R_d 和二极管电容 $C_d(V)$ 的串联模型。其中电容 C_d 是随二极管反向偏压 V 变化的函数,串联电阻 R_d 一般很小。

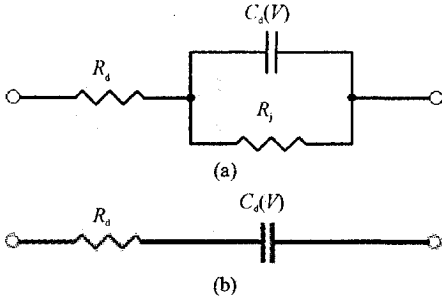


Fig. 2 Model of varactor diode

图 2 变容二极管模型

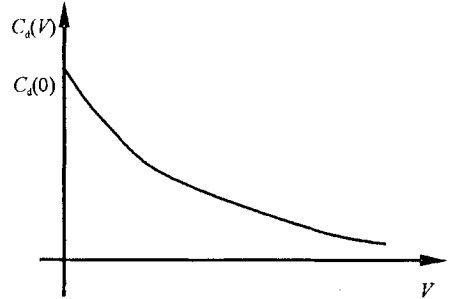


Fig. 3 Capacitance of varactor diode vs reverse bias voltage

图 3 变容二极管电容随反偏电压变化曲线

变容二极管的截止频率(小信号)和电容可表示为

$$\begin{cases} \omega_d = 1 / C_d(V) R_d \\ C_d(V) = C_d(0) (1 - V / V_0)^{-r} \end{cases} \quad (2)$$

式中: V_0 是决定于二极管本身特质的内接触电势,对于突变结 $r=0.5$,超突变结 $r=1 \sim 2$ 。二极管电容变化曲线如图 3 所示。典型变容二极管的特性参数主要有:二极管类型为 GaAs 和 Si,最大反向偏置电压为 20 ~ 30 V;品质因数为 3 000 ~ 6 000,零偏压和最大反偏电压的电容比值为 3.5 ~ 5.0,零偏压电容值为 0.4 ~ 3.0 pF,串联电阻值为 0.2 ~ 1.0 Ω 。

用于超快脉冲产生的变容二极管,选型时要注意几点:超突变结,即零偏压和最大反偏电压的电容比值越大越好,最大反向击穿电压越大越好,这样产生脉冲的幅度高,零偏压电容值和串联电阻 R_d 越小越好,GaAs 类型好。微脉冲公司的 MP6304 型 Si 超快变容二极管和 METELICS 公司的 MGV075-08 型 GaAs 超快变容二极管是两种较好的选择。

3 激振线电路模型

如图 4 所示,激振线电路由多级振荡线构成,每一级振荡线由一段相同长度 l 的高阻抗传输线节 Z_l, τ (相对于匹配负载 Z_0 高阻抗)和一个超快突变结变容二极管构成。因为传输线节 l 非常短,可以考虑做为理想化的无损传输线,因此传输线可等效为线节电感 L 和线节电容 C_l 。同时因为二极管电容 $C_d(V)$ 也非常小,二极管单位长度电容 $C_d(V) / l$ 近似恒定,因此具有图 4(b)所示的等效模型,同时第 n 个二极管上电压可近似推得

$$V_n(t) = V_{in} [t - n(V)] \quad (3)$$

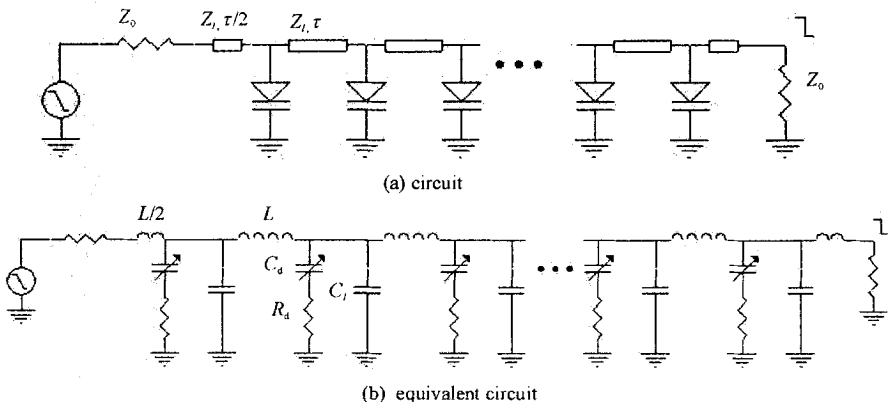


Fig. 4 Model of shock line circuit

图 4 激振线电路模型

$$\kappa(V) = \sqrt{I[C_d(V) + C_l]} \quad (4)$$

若输入信号 $V_{in}(t)$ 为下降沿负脉冲(二极管工作在负偏置状态), 初始电压为 V_h , 最终电压为 V_l , 利用变容二极管电容随反偏电压增大而变小的特性, 传输线上脉冲传播延迟的变化 $\kappa(V)$ 将导致输入负脉冲在传播期间的波前压缩, 即激振线第 n 段线节上的脉冲下降沿将随线节数 n 的增大而线性缩短(见图5)

$$t_{fn} = \max \begin{cases} t_{fin} - n[\kappa(V_h) - \kappa(V_l)] \\ 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中 Δt 为每段线节的脉冲前沿压缩时间。因此如果线节数 n 够大, 可以预测脉冲前沿将小于 0, 这当然不可能, 因此公式(5)是最大取值函数。如果 n 和 Δt 取值合适, 将图4(a)电路直接制作在 GaAs 基材上, 可以预测将产生前沿几 ps 的超快短脉冲, 但是需要精确设计和考虑 GaAs 芯片版图设计和工艺。

4 结论

激振线是一个近连续线的高阻抗微带传输线, 反偏压的变容二极管以相同的小间隔加载到传输线, 输入激励是一个下降沿的负脉冲。随着输入脉冲在传输线上的传播, 变容二极管的电容随反偏压增大而减小, 导致每个节点传播延迟的变化, 从而压缩脉冲波前, 达到产生超快短脉冲的目的。根据所建立电路模型的理论分析和计算公式, 激振线产生的超快脉冲前沿可达到 1 ps 级别, 能够满足高能物理实验和激光聚变实验对超快电子脉冲产生的需求。

参考文献：

- [1] 彭翰生. 高功率超短脉冲激光与新奇物理现象[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(4): 386-391. (Peng H S. High-power ultrashort pulse lasers and amazing phenomena of physics. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(4): 386-391)
- [2] Mishra U K, Brown A S, Rosenbaum S E. DC and RF performance of 0.1 μm gate length AlInAs-GaInAs pseudomorphic HEMT[C]//Proceedings of the Electron Device Meeting. 1988: 11-14.
- [3] Majidi-Ahy R. 100 GHz high-gain InP MMIC cascode amplifier[C]//Proceedings of the GaAs IC Symposium. 1990: 173-176.
- [4] Chen Y X, Yang M H, Tang D, et al. Picosecond pulse transmission line for multi-beam ultrashort laser pulses sampling[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2005, 14(4): 731-734.
- [5] Chen Y X, Yin X D, Tang D, et al. Design and simulation of 100 ps transient sampling gate based on high speed Schottky diode[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(1): 46-50.
- [6] Kane D J. Recent progress toward real-time measurement of ultrashort laser pulses[J]. *IEEE J of Quant Electr*, 1999, 35(4): 421-431.
- [7] Ihlenfeld W, Mohns E, Bachmair H, et al. Evaluation of the synchronous generation and sampling technique[J]. *IEEE Trans Instr Meas*, 2003, 52(2): 371-374.

Principle and model of ultrafast pulse generation based on shock line

CHEN Yu-xiao, ZHANG Yang, TANG Dan

(Institute of Electronic Engineering, CAEP, P. O. Box 919-521, Mianyang 621900, China)

Abstract: According to the principle of pulse wavefront compression, the model of a shock line circuit is proposed and the computing formulas of wavefront compression are deduced. The shock line is a nearly continuous high-impedance transmission line loaded at the same small spacings by reverse-biased varactor diodes. With the propagation of the input negative-falltime pulse along the transmission line, the capacitance of varactor diodes is decreased by the increase of reverse bias voltage, and the variation in propagation delay at the nodes results in the compression of negative-going wavefronts during propagation. So the wavefront of ultrafast pulses generated by the shock line can be 1 ps.

Key words: Ultrafast pulse generation; Shock line; Varactor diode; Pulse transmission line; Wavefront compression

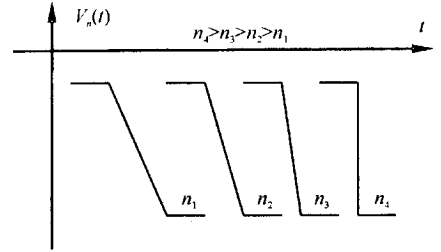


Fig. 5 Wavefront compression

图5 波前压缩