

简易的超宽带亚周期微波脉冲产生方法^{*}

王肖隆 张肖垒 王富丽 王子轩 林 强

(浙江工业大学 理学院 光学与光电子研究中心,杭州 310023)

摘要: 提出了一种简易的超宽带亚周期微波脉冲电路设计方案,该方案利用阶跃恢复二极管的阶跃特性和肖特基二极管正向压降小且恢复时间短的特性,产生单极性、亚周期的微波脉冲,其电路结构简单、体积小、设计制造成本低廉、调试方便。实验结果表明,采用该方案设计的微波脉冲发生器可以产生半高宽为 150 ps 的超宽带亚周期微波脉冲,且脉冲拖尾现象很小。在脉冲的重复率为 85 MHz 时,产生的脉冲幅值最大,约为 3.7 V,且波形拖尾现象最小。提出的设计适用于各类超宽带系统中的窄脉冲发生电路。

关键词: 超宽带,亚周期,窄脉冲,阶跃恢复二极管,肖特基二极管

A Simple Ultra-wideband Sub-cycle Microwave Pulse Generation Method

WANG Xiao-long, ZHANG Xiao-lei, WANG Fu-li, WANG Zi-xuan, LIN Qiang

(The Center for Optics and Optoelectronics Research, College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: A highly simplified method of ultra-wideband (UWB) microwave pulse generation is presented, in which the specific recovery characteristics of the step recovery diode and the small voltage drop and short recovery time of the Schottky diode are utilized. Microwave pulse generators following this design generate unipolar sub-cycle pulses with circuits that take advantage of their simple structure, small size, low cost in designing and manufacturing, and ease of tuning. Experiments with such pulse generators are able to produce UWB sub-cycle microwave pulses of 150 ps width (FWHM), with weak ringing effects. The amplitude of the pulse is maximum when the repetition rate of the pulse train is set at 85 MHz, and the ringing effects are at minimum. The presented design is suitable in UWB systems of various purposes.

Key words: ultra-wideband, sub-cycle, step recovery diode, Schottky diode

引 言

超宽带 (ultra-wide bandwidth, UWB) 技术是近年来迅速发展的一类无线技术。超宽带技术利用极窄脉冲作为传输载体,具有高传输率、高带宽、低频谱密度、抗干扰能力强等特点,因此可用于军事通信、无线局域网、雷达定位等多个领域^[1]。UWB 技术最初于 20 世纪 60 年代用于雷达系统,在其早期主要应用于军事方面^[2]。在 90 年代,美国联邦通信委员会(FCC)将其推广至民用领域。目前,超宽带技术在通信领域获得快速发展。超宽带亚周期微波脉冲是超宽带技术里重要的脉冲类型之一。宽度更窄,幅度更大,拖尾现象更小的超宽带亚周期微波脉冲产生技术仍是超宽带技术中的研究重点。

超宽带亚周期微波脉冲产生的方法大致可以分为两类:①利用数字逻辑电路的逻辑特性产生所需脉冲信号^[1]。这种方法虽然比较简单,且可以产生单极性脉冲,但是产生的脉冲的宽度较宽(在纳秒量级),幅度很低^[3]。②利用一些非常规半导体器件,结合脉冲整形网络产生脉冲宽度在皮秒级别且脉冲拖尾现象较小的微波脉冲。该类方法是目前采用较多的方法,常用于产生超短脉冲的半导体器件包括阶跃恢复二极管^[4-6]、雪崩三极管^[7-8]、光导开关^[9]等。该类方法是用全固态器件产生超宽带脉冲的基本方法^[10]。

在现有的利用非常规半导体器件产生超宽带亚周期微波脉冲的方法中,由于阻抗不匹配的原因,经常伴有较大的拖尾现象,常需要复杂的整形电路对

* 收稿日期:2017-10-20;修回日期:2018-03-01

基金项目:国家自然科学基金(11404286,61478069)

脉冲进行整形,减小拖尾现象,这使得整个脉冲产生过程复杂化。本文针对这种不足之处,提出了基于阶跃恢复二极管(step-recovery diode, SRD)和肖特基二极管组成的超宽带亚周期微波脉冲产生方法,并结合前端阻抗匹配网络以及 CITS25 微带线阻抗匹配设计软件,设计了一套结构简单,且脉冲拖尾现象较小的超宽带亚周期微波脉冲产生装置。本文设计的脉冲产生电路,其印刷电路板基材为常用的 FR-4 环氧层压板,电路简单,结构小巧,非常适用于小型化超宽带窄脉冲发射机等应用。

1 阶跃恢复二极管的特性

阶跃恢复二极管最早是由 Moll 等研制的一种特殊半导体器件,其特性基于少数载流子贮存效应^[11]。阶跃恢复二极管的半导体掺杂结构与普通二极管不同,在高掺杂层 p^+ 后先放一低掺杂层 n ,而后再放高掺杂层 n^+ ,构成 p^+nn^+ 结构,其掺杂结构示意图如图 1 所示。这种掺杂方法构成一个典型的缓变结结构。在正弦波激励下,阶跃恢复二极管呈现与普通二极管不同的电流响应特性^[12],如图 2 所示。

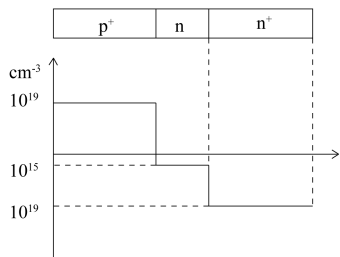
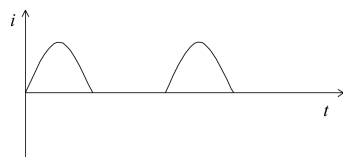
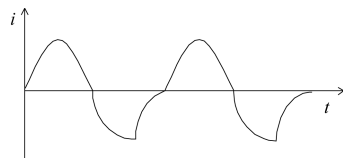


图1 阶跃恢复二极管掺杂浓度示意图



(a) 普通二极管



(b) 阶跃恢复二极管

图2 普通二极管和阶跃恢复二极管在正弦电压激励下的电流响应特性

当在阶跃恢复二极管两端施加正向电压时,阶跃恢复二极管的性能与普通二极管相同,处于正向导通状态,同时对 n 层充电。当施加的电压由正电压突然变为负电压时,普通二极管会立即进入反向

截止状态;而阶跃恢复二极管则在正向导通时对 n 层进行了充电,使其贮存一定的电荷,当施加电压变为反向时,由于阶跃恢复二极管 n 层贮存的电荷返回原处,因此会形成极大的反向饱和电流,这一过程持续的时间在纳秒数量级,称为存储时间。当这些电荷消耗完时,反向电流迅速减小到零,阶跃恢复二极管进入正常的反向截止状态,这一电流迅速减小的过程在数皮秒内完成,称为阶跃时间。在反向电流迅速增大和迅速减小的过程中,形成了陡峭的阶跃电压。理想的阶跃恢复二极管等效于一个从高阻到低阻状态转换的转换开关^[13]。

2 脉冲发生电路设计与分析

2.1 SRD 电路设计

根据上文对阶跃恢复二极管的特性分析,本文提出了基于阶跃恢复二极管与肖特基二极管的超宽带亚周期微波脉冲发生电路的设计。该设计结合了阶跃恢复二极管的阶跃特性和肖特基二极管正向压降小、恢复时间短的特性,电路如图 3 所示。该电路包括两个部分:脉冲产生部分和脉冲整形部分。脉冲产生部分电路基于阶跃恢复二极管,其具体器件选取主要考虑载流子寿命和阶跃时间两个参数。本文使用的 SRD 为 M-Pulse 公司生产型号为 MP4023 的阶跃恢复二极管,其载流子寿命和阶跃时间分别为 15 ns 与 50 ps。

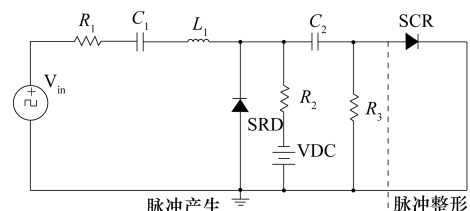


图3 超宽带亚周期微波脉冲产生电路

在脉冲产生部分电路中, V_m 为激励脉冲源,可以选取方波或正弦波脉冲激励; R_1 电阻与 C_1 电容串联组成一个前端阻抗匹配电路,实现与输入端阻抗的匹配, $R_1 C_1$ 匹配网络的转折频率 f_0 表达式为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \quad (1)$$

当通过信号频率大于 f_0 时, $R_1 C_1$ 串联电路阻抗不变,其阻抗模等于 R_1 的值。 $R_1 C_1$ 网络同时还具有隔离直流成分的作用。 L_1 为激励电感,对产生的脉冲的幅度有很大影响; L_1 越大,产生的脉冲的幅度越大,但是相应的脉冲宽度越宽, L_1 电感值的计算公式为:

$$L_1 = \left(\frac{\tau_p}{\pi}\right)^2 \frac{1 - \xi^2}{C_j} \quad (2)$$

式中 ξ 为电路的阻尼因子, C_j 为二极管结电容, τ_p 为脉冲宽度, 从公式(2)中可以看出, L_1 越大, 则产生脉冲的脉冲宽度 τ_p 也越大, 因此在实际选择过程中需综合考虑幅度与脉宽的设计需求。

电路中 VDC 为直流偏置电压; R_2 为偏置电阻, 起到保护电路的作用。需要指出的是, 当激励源采用方波时, 需要加一偏置电压 VDC 来保证 SRD 可以由导通变为截止状态。如果激励源采用正弦波, 则不需要偏置电压, 因为正弦波本身带有正负极性, 可以保证 SRD 由导通变为截止状态。 R_2 和 C_2 与 SRD 组成一个放电网络, 在 SRD 截止放电过程中组成一放电回路。脉冲下降沿的陡峭程度受 C_2 的影响, C_2 越小, 放电常数 $T = R_2 C_2$ 越小, 脉冲下降沿就越陡, 但是, 如果 C_2 越小, 也会使产生的脉冲幅度变小, 因此 C_2 的选取也需要考虑幅度和脉宽的需求。在具体实现中, 可以先设定一初始值, 再不断调节 C_2 的值, 找到最佳参数。亚周期脉冲的产生过程为: 在未加激励电压时, 偏置电压 VDC 使 SRD 处于导通状态, 当激励电压 V_m 到来时, 由于其极性为正极性, SRD 开始产生反向偏置, 此时激励电感 L_1 在正电压作用下积累能量。当 SRD 进入截止状态时, L_1 释放能量, 在 R_3 前端产生幅度很高的脉冲。此后, SRD 又恢复到正常导通状态, 激励电压 V_m 为周期性信号。通过调节激励源的频率, 可以得到不同重复频率的亚周期微波脉冲序列。

脉冲整形部分: 脉冲整形部分电路的原理利用了肖特基二极管 (SCR) 正向压降小、恢复时间短的特性。SCR 只允许脉冲的正极性部分通过。通过 SCR 后的脉冲, 基本滤除了前级脉冲中的电压抖动成分, 从而实现了对前级产生的脉冲整形。需要特别指出的是, 出于阻抗匹配的考虑, 在选取 SCR 的型号时, 需要选取在工作频率下阻抗约为 50Ω 的器件, 其阻抗的具体计算公式为:

$$Z = \frac{1}{2\pi f C_j(f)} \quad (3)$$

其中 $C_j(f)$ 为二极管在频率 f 下的结电容。

2.2 电路仿真

根据上文对 SRD 特性的介绍, 对 SRD 元件建立等效电路模型 (如图 4 所示)。 V_0 表示二极管的势垒电压, C_f 为正向导通时的扩散电容, C_r 为反向偏置下的耗尽层的电容, R_f 为结电阻, R_s 是串联电阻。在二极管正向导通时, 二极管等效于 R_f 和 C_f

组成; 当二极管由正向导通状态变到反向偏置状态时, 二极管等效于由 C_r 组成。根据 MP4023 型二极管的电气特性资料, 其 C_r 的典型值为 $0.2 \sim 0.5 \text{ pF}$, R_s 的典型值为 0.8Ω , C_f 可由特征时间 $\tau = R_f C_f$ 求得, R_f 则可由直流伏安特性 I-V 曲线得到。

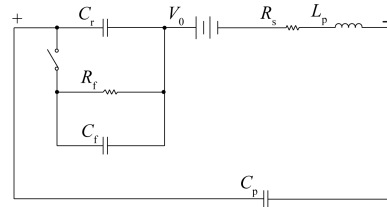


图4 SRD 等效电路

SRD 元件中, 电荷量与电压的关系式为:

$$Q = \begin{cases} C_r \times V, & V \leq 0 \\ \frac{C_f - C_r}{2V_0} \left(V + \frac{C_r V_0}{C_f - C_r} \right) - \frac{C_r^2}{2(C_f - C_r)} V_0, & 0 < V < V_0 \\ C_f V - \frac{C_f - C_r}{2} V_0, & V \geq V_0 \end{cases} \quad (4)$$

在运用 ADS 软件对脉冲产生电路进行仿真时, 由于软件中不包括现成的阶跃恢复二极管模型, 需要运用其 SDD (symbolically defined devices, 符号定义器件) 功能进行建模, 模型如图 5 所示。将 MP4023 型阶跃恢复二极管的各项参数与公式(4)运用到该模型中, 就可得到 MP4023 在 ADS 软件中的模型。将该模型结合图 3 的脉冲产生电路在 ADS 软件中进行仿真, 激励源 V_m 设置为 85 MHz 的正弦波, 幅度为 20 V , L_1 为 9 nH , C_2 为 4 pF , R_3 为 50Ω 。

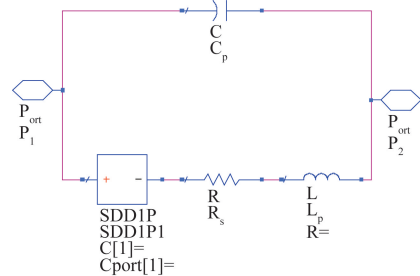


图5 SRD 的 Spice 模型

通过仿真, 发现当电容 C 调节至 3 pF 时, 得到的脉冲拖尾现象比较小, 波形质量较好, 其仿真结果如图 6 所示, 仿真结果表明, 该方法可以产生半高全宽约为 130 ps 的微波脉冲, 脉冲幅度约为 4 V 。

3 电路实际制作与测量

为了保证整个脉冲产生和整形过程中的阻抗匹

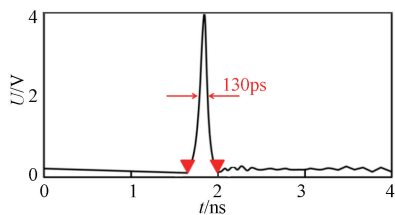


图6 ADS 仿真结果

配,本设计利用 CITS25 阻抗匹配计算软件设计一个 $50\ \Omega$ 阻抗的微带线传输方案,其示意图与设计参数如图 7 所示,微带线上宽 W 为 2 mm,下宽 W_1 为 2.1 mm,边缘距离 S 为 0.6 mm,微带线厚度 T 为 0.072 mm,基底材料为 FR-4 环氧层压板,其介电常数为 4.4,厚度 H 为 1.6 mm,经软件计算,该传输方案微带线阻抗为 $49.91\ \Omega$,十分接近 $50\ \Omega$ 。电路图和电路实物图如图 8、9 所示。

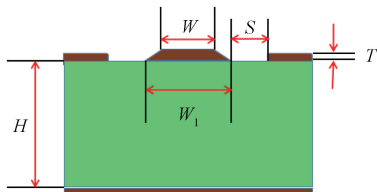


图7 微带传输线截面图

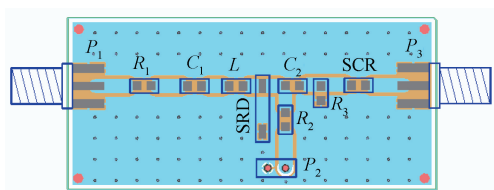


图8 超宽带亚周期微波脉冲 PCB 示意图

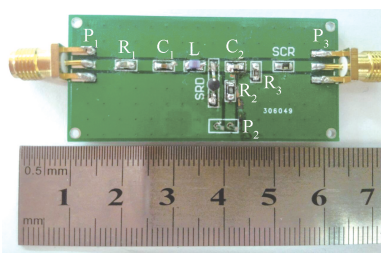


图9 超宽带亚周期微波脉冲产生电路实物

在脉冲发生和整形电路的实际性能测试过程中,采用 Agilent 公司(现为 Keysight 公司)生产的 86100A 型采样示波器和 54754A 采样模块,其测量带宽为 18 GHz;激励源是基于 AD9910 型数字信号合成芯片(DDS)的正弦信号发生器,其输出的激励信号是频率为 80 MHz 的正弦波。由于 DDS 直接产生的信号幅值很小,只有 200 mV 左右($50\ \Omega$ 阻抗,下同),不足以驱动超短脉冲发生电路,因此在实际实验过程中利用微波功率放大器将该正弦信号的幅

度放大到 20 V 左右。电感 L 的电感值为 9 nH;电容 C_2 的初始选值为 3 pF,电阻 R_3 为 $50\ \Omega$;SCR 选用型号为 1PS10SB82 的肖特基二极管。由于实际实验过程中所用的激励信号为正弦波,因此不需要加偏置电压。

为了充分发挥肖特基二极管脉冲整形电路的整形作用,首先针对未经脉冲整形的初级脉冲波形进行测试,以产生拖尾现象集中在零点附近或负极部分的初级脉冲。实验中发现, C_2 取 3 pF 时,产生的脉冲波形并不理想,下降沿未到 0 电位,通过调整电容 C_2 取值,发现在 C_2 选值为 1 pF 时产生的脉冲效果最好,其脉冲波形如图 10 所示(未经过脉冲整形电路整形)。

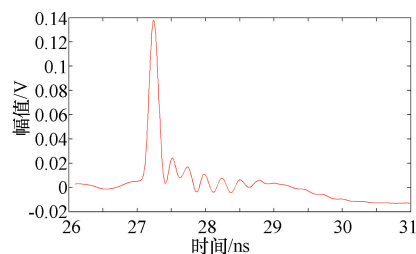


图10 未经过脉冲整形的脉冲波形

该超宽带亚周期微波脉冲在激励源频率为 70 ~ 90 MHz 内都可触发产生,在 85 MHz 正弦激励下,经过整形之后的脉冲波形拖尾现象较小,且幅值最大,其波形如图 11 所示。亚周期微波脉冲的半高全宽为 150 ps,峰值电压 3.7 V,拖尾现象也很小,并可以利用宽带微波功率放大器进一步放大。实验结果与仿真结果基本一致,脉冲宽度与仿真结果相比略宽一些,幅度比仿真结果略小,产生偏差的主要原因是实际电路中存在一些其他影响因素,例如,焊盘之间存在电容、传输过程中发生了损耗等。其频谱图如图 12 所示,该微波脉冲的 -10 dB 带宽约为 3.2 GHz。

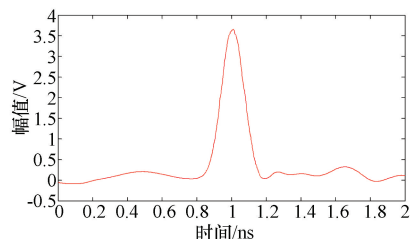


图11 在 85 MHz 正弦激励下经过脉冲整形的亚周期微波脉冲信号

与其他方法(例如在脉冲产生后运用复杂的电路进行整形)相比,本文设计的超宽带亚周期脉冲产生方法更加简单,更易于调试。本方法也具有进

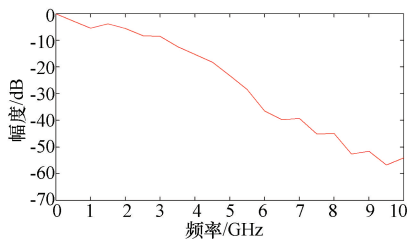


图12 85 MHz激励产生的脉冲频谱

一步改进的前景。例如,在脉冲产生电路中选取反向恢复时间更短的阶跃恢复二极管型号,可以得到脉冲宽度更窄、频带更宽的超宽带亚周期微波脉冲。

4 结论

本文设计了一种基于阶跃恢复二极管、LC充放电网络和肖特基二极管的亚周期微波脉冲产生和整形电路,与以往的亚周期微波脉冲产生方法相比,该设计的电路结构非常简单,设计制造成本低廉,能够产生拖尾现象极小的超宽带亚周期微波脉冲。实验结果表明:基于该方法产生的超宽带亚周期微波脉冲的半高宽度可达150 ps, -10 dB带宽约为3.2 GHz,经脉冲整形后,脉冲峰值电压为3.7 V,且拖尾现象非常微弱。这种亚周期微波脉冲发生装置可以很方便地集成在各类微波和超宽带设备中,可满足通讯、雷达、科学研究等多个领域的应用需求,具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] Fontana R J. Recent system application of short-pulse ultra-wideband(UWB) technology[J]. IEEE Transactions Microwave Theory and Techniques, 2004, 52(9):2087-2104
- [2] Siwiak K, Withington P, Phelan S. The emergence of an important RF technology[A]. IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference VTC2001 [C], Rhodes, Greece, 2001. 1169-1172
- [3] 刘丽华,周斌,方广有. 超宽带雷达系统中皮秒级脉冲源的研制[J]. 微波学报, 2010, 26(1):46-49
Liu L H, Zhou B, Fang G Y. Design of picosecond in ultra-wideband radar system[J]. Journal of Microwaves, 2010, 26(1): 46-49
- [4] Protiva P, Mrkvica I, Machac J. A compact step recovery diode subnanosecond pulse generator[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2010, 52(2):438-440
- [5] Han Jeongwoo, Cam Nguyen. A new ultra-wideband, ultra-short monocycle pulse generator with reduced ringing [J]. IEEE Microw Wireless Compon Lett, 2002, 12(6): 206-208
- [6] 周建明,费元春. 新型超宽带雷达发射机技术[J]. 兵工学报, 2008 (2):240-243
Zhou J M, Fei Y C. Novel ultra-wideband radar transmitter technology[J]. Acta Armamentarii, 2008 (2):240-243
- [7] 杨峰,薛泉,陈志豪. 一种基于射频三极管的高斯脉冲发生器的设计[J]. 通信学报, 2005, 26 (10):69-71, 77
Yang F, Xue Q, Chen Z H. Design of a subnanosecond Gaussian pulse generator based on the RF transistor[J]. Journal on Communication, 2005, 26(10):69-71, 77
- [8] Reizenzahn A, Buchegger T, Kaineder G, et al. A low-cost UWB radar system for sensing application [A]. IEEE. International Microwave Symposium Digest [C], Waltham, USA: IEEE, 2006. 299-302
- [9] 姜苹. 基于光导开关的纳秒脉冲功率源技术研究[D]. 北京:中国工程物理研究院, 2012
Jiang P. The research of optical switch nanosecond pulse power source technology base on optical switch[D]. Beijing:China Academy of Engineering Physics, 2012
- [10] 张岩松,张亚东,梁步阁,等. 基于场效应管与阶跃恢复二极管的皮秒级脉冲源设计[J]. 强激光与粒子束, 2017 (4):81-85
Zhang Y S, Zhang Y D, Liang B G, et al. Design of picosecond pulse source base on MOSFET and step recovery diode[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017 (4):81-85
- [11] Moll J L, Hamilton S A. Physical modeling of the step-recovery diode for pulse and harmonic generation circuits [J]. Proc of the IEEE, 1969, 57(7): 1250-1259
- [12] 叶传纶,曹禄晋. 阶跃恢复二极管的工作原理及应用[J]. 集成电路应用, 1986(2):59-61, 69
Ye C L, Cao L J. The working principle and application of SRD[J]. Application of Integrated Circuits, 1986(2): 59-61, 69
- [13] Zhang J, Raisanen A V. Computer-aided design of step recovery diode frequency multiplier[J]. IEEE Transactions on MMT, 1996, 44(12):2612-2616

王肖隆 男,1984年生,副教授。主要研究方向:冷原子物理、超短超快脉冲。

E-mail:xlwang@zjut.edu.cn

张肖垒 男,1992年生,硕士生。主要研究方向:超短脉冲。

E-mail:2448247954@qq.com