



·高功率微波技术·

S 波段高精度快速倒相开关设计

白维达, 江涛, 熊正锋, 蒋自力

(西北核技术研究院, 高功率微波技术重点实验室, 西安 710024)

摘要: 倒相开关是能量倍增器法(SLED)脉冲压缩系统中的关键器件, 它的倒相精度和开关速度对脉冲压缩系统的性能有重要影响。设计了一种工作在 S 波段的精度可调、响应迅速的微带反射式倒相开关, 并对其进行了理论分析, 电路结构设计和仿真研究。对倒相开关的反射终端进行了改进设计, 利用一个变容二极管来代替传统的并联枝节电路, 通过调节变容二极管的偏置电压改变反射终端的反射系数, 从而实现对倒相相位的精确调节。仿真结果表明, 倒相开关响应时间约 4 ns, 且通过调节变容二极管偏置电压可以在一定范围内调节倒相精度。

关键词: 倒相开关; 能量倍增器法; 脉冲压缩; 精度可调; 开关速度

中图分类号: TN623

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190394

Design of S-band bi-phase modulator with high speed and accuracy

Bai Weida, Jiang Tao, Xiong Zhengfeng, Jiang Zili

(Science and Technology on High Power Microwave Laboratory, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: Bi-phase modulator is one important component in SLAC energy doubler (SLED) pulse compression systems. Performance parameters such as precision and speed of phase shift have significant impact on SLED. In this paper, an S-band bi-phase modulator with fast speed and adjustable accuracy is presented. Precision of the phase shifter is related to two parallel varactors, controlled by bias voltage. The simulated results show that the proposed bi-phase modulator has a fast switching speed of 4 ns and a high phase shift accuracy.

Key words: bi-phase modulator; SLAC energy doubler; pulse compression; adjustable accuracy; phase shift speed

脉冲压缩技术是将功率较低的长脉冲压缩为脉冲峰值功率较高的窄脉冲的有效方法^[1-5], 其中能量倍增器法(SLED)脉冲压缩系统具有结构简单、高效率和高稳定性的优点, 而被广泛应用于加速器领域^[6-9]。SLED 脉冲压缩系统利用倒相开关将输入微波信号的相位反向来提取储能能量, 倒相时刻、倒相精度以及倒相开关响应速度都会影响输出峰值功率、脉冲宽度及能量效率^[10]。目前国际上生产倒相开关的厂家主要是美国的 PMI 公司, 其生产的 S 波段产品倒相时间约 15 ns, 倒相精度 $180^\circ \pm 25^\circ$, 且不具备倒相精度调节功能; 而国内尚无倒相开关成熟产品。本文设计了一种 S 波段反射式倒相开关, 通过研究影响 PIN 开关二极管响应时间的因素, 实现了快速倒相; 同时通过研究倒相开关的工作原理, 设计并优化了倒相开关的电路结构, 通过改进反射终端, 实现了对倒相相位的精确调节。

1 基本原理及电路优化

倒相开关通常采用反射式微带电路结构, 如图 1 所示。在理想状态下, 反射终端由一个 PIN 开关二极管和一段四分之一波长的微带线组成。当控制偏置电压改变二极管开关状态时, 反射终端反射系数的相位就会改变 180° , 输出端信号也就实现了 180° 相位翻转。对于非理想状态的 PIN 二极管来说, 由于寄生电阻和电抗的存在, 相移量会偏离 180° , 因此需要增加一个并联枝节匹配电路, 通过调节并联枝节的长度, 可以抵消二极管中寄生电阻和电抗的影响^[11-14]。

由于加工误差和实际电路中存在的电磁耦合的影响, 倒相开关一般无法精确实现 180° 相位翻转的效果。当倒相开关应用于 SLED 脉冲压缩系统时, 倒相精度的不足将导致峰值功率增益降低, 影响脉冲压缩装置输出微波脉冲相位, 进而影响后续脉冲功率的合成, 导致合成效率降低。针对这个问题, 本文对反射终端进行了改进设计, 用

一个变容二极管来代替并联枝节电路,如图2所示。通过调节变容二极管的偏置电压改变反射终端的反射系数,从而实现倒相开关倒相相位的精确调节。

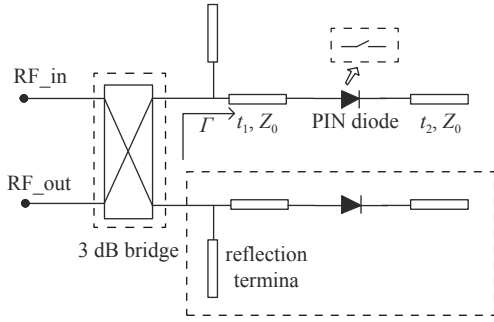


Fig. 1 Diagram of reflection type bi-phase shifter

图 1 反射式倒相开关电路结构示意图

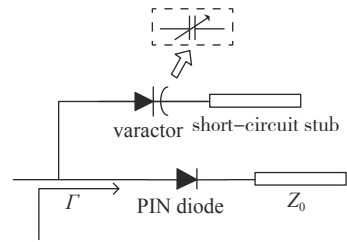


Fig. 2 Diagram of proposed reflection terminal

图 2 新型反射终端结构

2 开关速度

倒相开关的速度对 SLED 脉冲压缩系统的性能有很大影响,开关时间太长将导致上升沿时间增加、峰值功率增益降低和脉冲压缩效率降低等问题。为了满足脉冲压缩系统的需求,应尽量保证倒相开关响应时间不大于 20 ns。

微带反射式倒相开关的倒相时间主要与 PIN 二极管的响应时间有关。PIN 二极管的正向导通时间比较短,而关断过程速度受限较为显著。关断过程所需的反向恢复时间包括存储延迟时间 t_s 和渡越时间 t_r ,其中 t_r 容易受测量电路寄生电容的干扰而失真,通常把 t_s 作为影响 PIN 二极管关断速度的主要因素。

存储延迟时间 t_s 主要取决于载流子寿命 τ_p 、正向电流 I_F 和反向电流 I_R 。它们之间的关系可以用公式表示如下^[15]

$$t_s = \tau_p \ln\left(1 + \frac{I_F}{I_R}\right) \quad (1)$$

可以看出, t_s 随着 I_F 的增加而增加,随着 I_R 的增加而减小,与 τ_p 成正比。因此,为了减少开关响应时间,需要选用载流子寿命短的二极管,同时在保证二极管不击穿的前提下,增大反向电流与正向电流的比值。

3 仿真实验

根据上述理论,设计了如图3所示的电路结构,并利用 ADS 进行了仿真验证。电路工作的中心频率为 2.856 GHz。电路中使用的 PIN 二极管模型为 MA-COM 公司的 MA4GP907,载流子寿命 2 ns,零偏结电容 0.03 pF;变容二极管模型为 SKYWORKS 公司的 SMV2019-079LF,其寄生电阻 4.8 Ω ,结电容变化范围 0.30~2.20 pF;采用的介质基板为 Rogers 4350a,介电常数 3.66。

为了验证二极管的 I_F/I_R 对倒相开关响应速度的影响,图4中对比了反向偏置电压为 3 V,正向偏置电压分别为 2, 3, 4, 5 V 时倒相开关的响应时间。仿真中使用阶跃电源进行时域测试,在第 5 ns 时二极管偏置电压由正向变为反向,上升沿 1 ns,倒相开关的响应时间为从偏置电压改变时刻开始到信号幅度恢复到 90% 时刻结束。图4(a)中,在第 9 ns 时,输出信号实现 180° 翻转,即倒相开关响应时间约 4 ns。随着正向偏置电压的升高,倒相开关的响应时间逐渐增加,图4(d)中倒相开关的响应时间增加到了约 8 ns,从而有效证明了上一节中的理论分析。

图5是在反向偏置电压为 3 V,正向偏置电压为 2 V 情况下,第 9 ns 时的输出信号。其中,实线是经过倒相开关倒相后的信号,虚线是作为对比的不经倒相的信号(在第 5 ns 偏置电压保持 +2 V 不变),通过对比两条曲线可以直观地看出在第 9 ns 时完成了倒相。

为了获得尽量短的响应时间,使 PIN 二极管的正向偏置电压为 2 V,反向偏置电压为 3 V。图6为 PIN 二极管

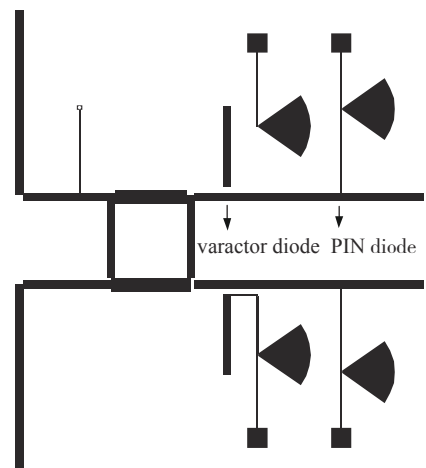


Fig. 3 Layout of proposed bi-phase shifter

图 3 新型倒相开关版图

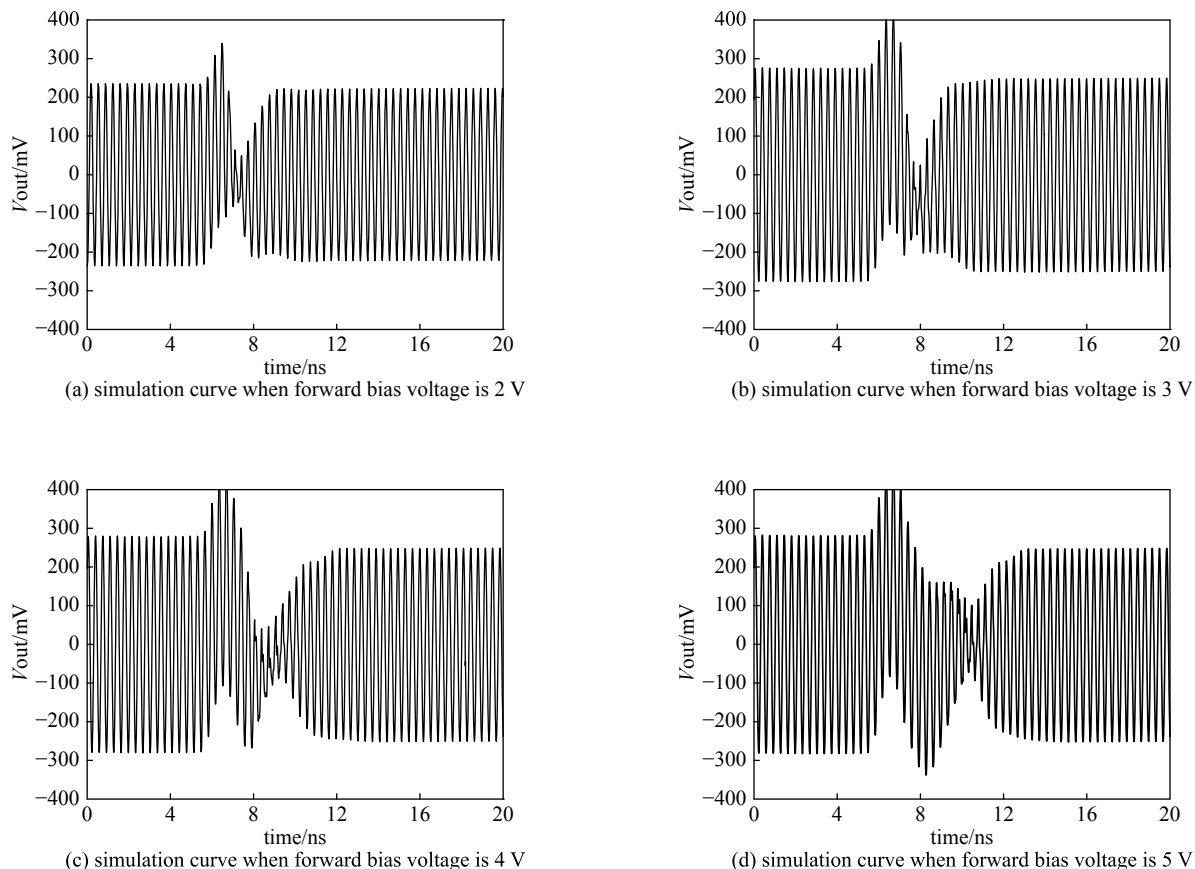


Fig. 4 Simulation results of time domain

图4 时域仿真结果

偏置电压分别为 2 V 和 -3 V 时的倒相开关 S 参数仿真结果。由图 6 可以看出, 在 2.83~2.89 GHz 频带范围内, 调节 PIN 二极管偏置电压前后, S_{11} 始终小于 -30 dB, 电路匹配状况良好; 调节偏压前后 S_{21} 约 -1.3 dB, 且插入损耗波动较小, 在中心频率 2.856 GHz 处插入损耗波动接近于 0。由图 6(c) 可以看出, 在 2.83~2.89 GHz 频带范围内, 偏置电压改变前后整个电路的相移量改变 $180^\circ \pm 10^\circ$, 在中心频率 2.856 GHz 处相移量约为 180° 。图 7 反映了电路的倒相精度调节能力, 仿真中以 t_1, t_2 两条微带线长度的变化来代替加工精度及电磁耦合带来的影响。由图 7 可知, 当 t_1, t_2 两条微带的长度 (对应图 1 中 t_1, t_2) 分别变化 2 mm 时, 相移量发生偏移, 通过调节变容二极管的偏置电压 V_0 , 可以使相移量恢复到 180° 。

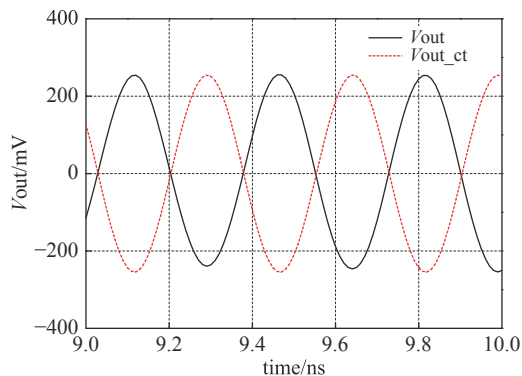


Fig. 5 Simulation results of signal at 9 ns with and without phase shift

图5 9 ns 时经过倒相和未经过倒相的信号对比

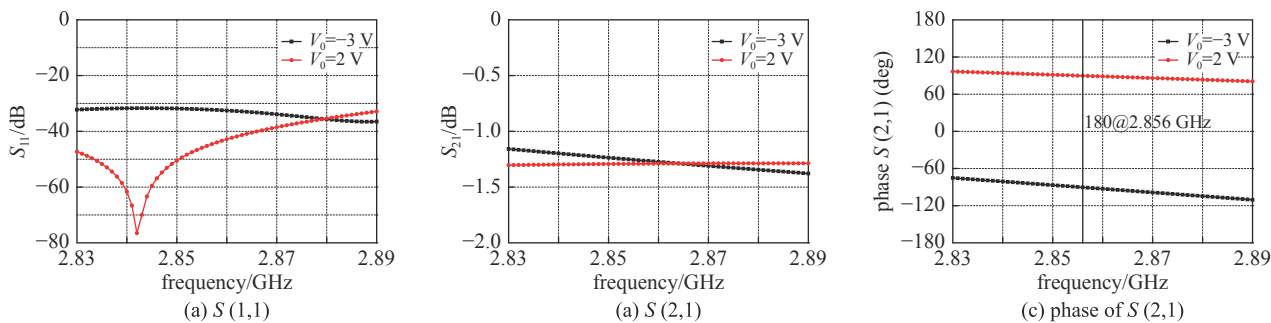


Fig. 6 Simulation results of S -parameter

图6 S参数仿真结果

4 结论

本文通过研究反射式倒相开关的工作原理,利用变容二极管的变容特性,设计了一款工作于S波段,能够实现快速高精度倒相的倒相开关。仿真结果表明该倒相开关可以在4 ns内实现相位翻转,同时具有一定范围的精度调节能力,可以抵消由于加工误差及电磁耦合等带来的相移量偏移,对提高脉冲压缩的效率和进一步脉冲功率合成有重要意义。

参考文献:

- [1] 周传明, 刘国治, 刘永贵, 等. 高功率微波源[M]. 北京: 原子能出版社, 2007. (Zhou Chuanming, Liu Guozhi, Liu Yonggui, et al. High-power microwave sources[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2007)
- [2] Vikharev A L, Petelin M I, Pavelyev V G, et al. High power microwave pulse compressors[C]//4th IEEE International Conference on Vacuum Electronics. 2003: 53.
- [3] Yushkov Y G, Artemenko S N, Novikov S N, et al. Development of microwave pulse compressors[C]//9th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology. 2005: 838-842.
- [4] Brown P, Syratchev I. 3 GHz barrel open cavity (BOC) RF pulse compressor for CTF3[C]//IEEE MTT-S International Microwave Symposium. 2004: 1009-1012.
- [5] Artemenko S N, Igumnov V S, Shlapakovskiy A S, et al. Compact active S-band microwave compressors for producing rectangular pulses of up to 100ns[J]. *IEEE Trans Microwave Theory and Techniques*, 2019, 67(2): 597-605.
- [6] 熊正锋, 宁辉, 陈怀璧, 等. 一种耦合度可调节的微波脉冲压缩装置设计及实验[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 073001. (Xiong Zhengfeng, Ning Hui, Chen Huaibi, et al. Design and experiment of microwave pulse compressor with adjustable coupling coefficient[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 073001)
- [7] Xiong Z F, Cheng C, Yu J. Switching speed effect of phase shifter keying in SLED for generating high power microwaves[J]. *Chinese Physics C*, 2016, 40(1): 1-5.
- [8] Farkas Z D, Hogg H A. SLED: A method of doubling SLAC's energy[R]. SLAC-PUB-1453.
- [9] 沈旭明, 张鹏, 和天慧, 等. 能量倍增器法微波脉冲压缩[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(4): 849-852. (Shen Xuming, Zhang Peng, He Tianhui, et al. High power microwave pulse compression of energy doubles[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(4): 849-852)
- [10] Pei S L, Li X P, Xiao O Z. Error and jitter effect studies on the SLED for the BEPC II-linac[J]. *Chinese Physics C*, 2012, 36(5): 456-463.
- [11] Sherman V, Setter N, Tagantsev A, et al. Digital reflection-type phase shifter based on a ferroelectric planar capacitor[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2001, 11(10): 407-409.
- [12] Glance B. A fast low-loss microstrip p-i-n phase shifter[J]. *IEEE Trans Microwave Theory and Techniques*, 1979, 27(1): 14-16.
- [13] Glance B, Amitay N. A fast-switching low-loss 12-GHz microstrip 4-PSK path length modulator[J]. *IEEE Trans Communications*, 1980, 28(10): 1824-1828.
- [14] Chongcheawchamnan M, Bunnjaweht S, Kpogla D. Microwave I-Q vector modulator using a simple technique for compensation of FET parasitics[J]. *IEEE Trans Microwave Theory and Techniques*, 2002, 50(6): 1642-1646.
- [15] Pierret R F. 半导体器件基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 232-244. (Pierret R F. Semiconductor device fundamentals[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004: 232-244)

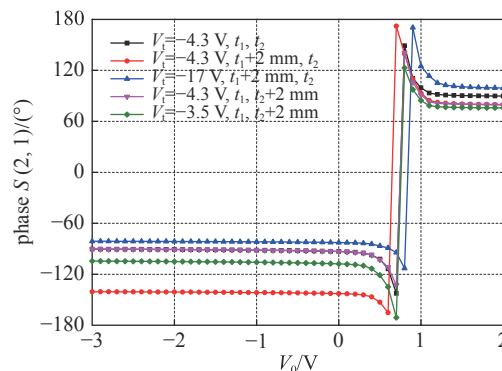


Fig. 7 Simulation results of adjustable accuracy

图7 相移量调节仿真结果