第 23 卷第 11 期 强 激 光 与 粒 子 束 Vol. 23, No. 11
2011 年 11 月 HIGH POWER LASER AND PARTICLE BEAMS Nov., 2011

文章编号： 1001-4322(2011)11-3029-04

高功率 PIN 限幅器设计及测试方案*

张海伟， 史小卫， 徐 乐， 魏 峰

（西安电子科技大学 天线与微波技术国家重点实验室，西安 710071）

摘 要： 介绍了利用 PIN 二极管进行高功率无源限幅器的设计方法，分析了影响限幅器功率容量、限幅电平、尖峰泄露、响应速度及恢复时间等的因素。利用平面微带电路的形式，提出了无源检波式及主动式 PIN 限幅器设计，仿真结果表明：该无源检波式限幅器起限电平约为－3 dBm，脉冲功率容量 60 dBm，限幅电平 15 dBm 左右。针对设计的限幅器，提出了用于测试限幅器性能的高功率实验平台。该平台采用双路双频耦合测量，具有很高的大小信号隔离度，能够进行高功率脉冲、连续波测试，在准确测量限幅器的功率容量、限幅电平、响应速度及恢复时间等指标方面具有很高的可靠性。

关键词： 高功率； PIN 限幅器； 无源检波限幅器； 主动式限幅器； 高功率测试平台

中图分类号： TN322.8 **文献标志码：** A **doi**:10.3788/HPLPB20112311.3029

限幅器属于微波控制器件，雷达通信中常将其用于微波信号接收机前端，防止大功率信号对具有高灵敏度的低噪声放大器及其它接收元件的毁伤[1]。PIN 二极管限幅器是利用高功率电导率调制效应进行限幅，由于 PIN 二极管具有插入损耗小、反应迅速、恢复时间短、承受功率容量大等特点，被广泛应用于平面限幅器研究中。有关 PIN 二极管限幅器方面的研究也日趋多样化。文献[2]研究了 PIN 二极管限幅器在高功率微波激励下的响应，对二极管微波响应截止频率作了探讨。文献[3-4]利用 Pspice 等效电路模型，研究了温度对 PIN 二极管限幅器功率响应特性及尖峰泄露的影响。出于对大功率限幅器安全性能的考虑，文献[5]研究了电磁脉冲后沿作用下 PIN 二极管限幅器的瞬态响应。针对近年来高功率防护工程进展的新需求，如起限电平低、功率容量高、限幅电平低等，本文从限幅器电路设计方面入手，通过分析影响 PIN 二极管限幅器性能的因素，设计了一款无源检波式 PIN 二极管限幅器，并针对某些特殊环境下的高功率防护中限幅器自身安全性的考虑，提出了主动式限幅器设计的思路及用于测试限幅器性能的高功率实验平台。

1 限幅器设计

1.1 技术指标

限幅器设计中常常关注的技术指标有功率容量、限幅电平、起限电平和插入损耗。此外，由于考虑到尖峰泄露及限幅器的恢复能力，限幅器的响应速度和恢复时间也应作为技术指标予以考虑。结合项目背景需求，本文设计所考虑的限幅器技术指标如下：(1)功率容量，即限幅器自身所能承受的最大输入功率，分为连续波最低 37 dBm，脉冲峰值最低 50 dBm；(2)限幅电平，即限幅器允许输出的最大信号功率，由于受后级低噪噪声放大器线性度的制约，该功率应控制在脉冲峰值 10 dBm 以内；(3)起限电平，即限幅器开始限幅时的输入功率，根据防护电路的特殊需求，该指标控制在 5 dBm 以下；(4)响应速度，以大功率信号到达限幅器为起点，至限幅器开始限幅的这段时间。由于该段时间限幅器对于大信号同样呈现通路，将会对后级器件产生损伤，因此必须做到响应速度快以减少限幅器尖峰泄露。该指标应保证在 10 ns 范围内；(5)恢复时间，即从高功率信号消失到限幅器插入损耗降至小信号传输时的插损 3 dB 以内的时间。该指标反应了限幅器恢复能力，越小越好，保证在 50 ns 以内；(6)插入损耗，理想情况下，并联型限幅器小信号传输时呈高阻特性，插入损耗为零，但实际使用的 PIN 二极管自身存在结电容等寄生参数，往往会带来一定量的插损，由于有用信号的衰减会降低接收机灵敏度，因而工程设计中保证限幅器整体插损小于 1 dBm。

1.2 限幅器设计分析

PIN 二极管限幅器根据其电路连接形式分为并联和串联限幅器，由于并联形式具有插入损耗小、散热好等优势，因而实际应用较多。根据PIN限幅器使用控制器件的数目又分为单管限幅和级联限幅，由于单只PIN

* **收稿日期：**2011-06-29； **修订日期：**2011-08-31
作者简介：张海伟(1986—)，男，硕士研究生，主要研究领域为高功率防护、微波电路设计、射频识别；zhanghaiweimail@163.com。

二极管自身的限幅能力有限，且在导通速度上也有许多不足，因此，工程设计中多利用级联的方式实现限幅能力强、反应灵敏度高的限幅器。

传统的限幅器如图 1 所示，采用扼流线圈与单只 PIN 二极管并联设计的方式，扼流线圈为二极管提供直流通路。该电路形式由于使用了扼流线圈因而插损较大，解决该问题的方法之一是适当调整扼流线圈，使之与二极管的寄生电容形成并联谐振，可以在一定程度上降低小信号的插入损耗，然而该效果只限于窄带使用。其次是当使用的 PIN 二极管的载流子的渡越时间大于设计频率信号半个周期时，即设计频率较低时可以采用反向对管来替代高频扼流圈的使用[6]，具体电路如图 2 所示。

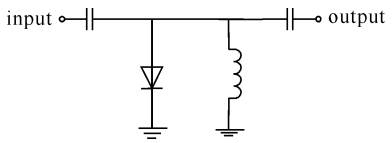

Fig. 1 PIN limiter with single diode

图 1 单管 PIN 限幅器

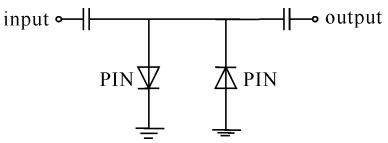

Fig. 2 PIN limiter with double shunt diodes

图 2 对管 PIN 限幅器

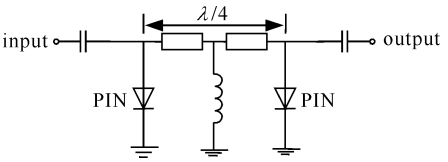

Fig. 3 Limiter with quarter-wave transmission line

图 3 四分之一波长传输线型 PIN 限幅器

由于单只二极管能够提供的隔离度为 15～20 dBm，因此高于该指标的限幅器必需采用多个二极管级联。如图 3 所示。由于二极管功率容量和反应时间与本征层厚度有关，因此级联时选择前端二极管本征层较厚，后端本征层较薄，两管相距四分之一波长[7-8]。该设计的特点是，当大功率能量进入限幅器时，由于后级二极管本征层厚度与前级二极管相比较薄，对高功率响应较为迅速，因而先行导通。导通后对高频能量形成低阻抗短路，经四分之一波长传输线到第一只二极管处等效为高频开路，因此能量主要集中在第一只管子上，使其得以快速导通进入限幅状态。由于本征层厚度及寄生并联电容不同，因此该限幅器的插入损耗主要由第一级二极管决定，而响应时间特性则由后级 PIN 二极管决定。

1.3 无源检波式限幅器设计

由于限幅器使用的 PIN 二极管 I 层厚度最薄约为 1 μm，该厚度决定了其起限电平在 7 dBm 左右[8]，而实际工程有时需要限幅器起限电平低于该功率值。由于 PIN 二极管对高频信号响应慢而直流响应迅速，因而可以利用耦合检波电路为 PIN 二极管提供直流偏压，设计如图 4 所示的无源检波式限幅器。

该限幅器同样采用相距四分之一介质波长的三级级联方式设计，使用的 PIN 二极管本征层厚度从前向后依次变薄，功率容量也依次降低，而响应速度依次加快。使用肖特基包络检波作为最后一级 PIN 的直流馈电，以进一步提高后级二极管的响应速度，降低整个限幅器的起限电平。检波电路利用微带耦合设计，耦合量的大小根据选用的肖特基管型及 PIN 二极管的特性而定。试验中选取 PIN 二极管 I 层厚度依次为 2 μm，1 μm。耦合检波电路耦合量为 10 dB。图 5 为仿真实现 1.3 GHz 连续波注入时的二极管输入功率和输出功率曲线，可见，该限幅器起限电平约为－3 dBm。此处由于只关注限幅器的起限电平，没有考虑级联限幅的时间特性及最终毁伤情况，因而曲线较为平滑，而实际中的功率曲线往往会由于 PIN 二极管反应时间不同步而在限幅阶段出现起伏。

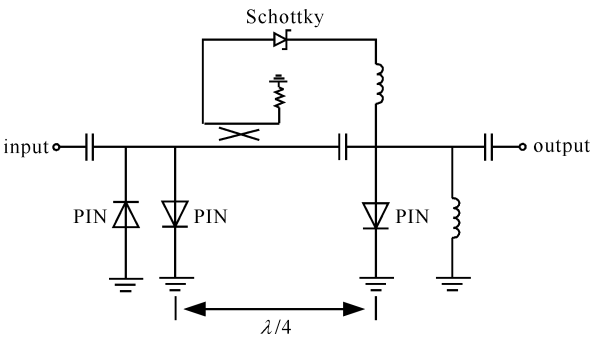

Fig. 4 Passive detector limiter

图 4 无源检波式限幅器

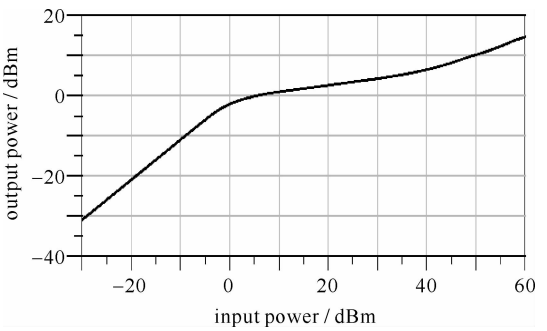

Fig. 5 Power response of passive detector limiter

图 5 无源检波式限幅器功率响应曲线

该设计不足之处在于限幅器尺寸过大，并且由于级联二极管过多导致插损变大（约为 0.8 dB），因此适用于功率要求指标较高而插损指标较小的场合。

1.4　主动式限幅器设计

PIN 二极管限幅器尽管采用级联的方式可以提高限幅电平及功率容量，而在某些极端情况下，PIN 二极管限幅器所面对的注入功率可能远远超出自身功率容量，因而限幅器本身同样面临被损坏的危险。为此，本文介绍了一种主动式限幅器设计，具体电路图如图 6 所示。该限幅器由电调衰减器和 PIN 限幅器级联而成，电调衰减器能承受足够高的功率容量，其衰减量由后级 PIN 限幅器转换输出的电流予以控制。当入射功率小于限幅器功率容量的情况下，电调衰减器不工作，其插入损耗为零，后级 PIN 限幅器独立承担限幅任务。当入射功率超出限幅器功率容量时，限幅器通过将检波转换的部分电流作为驱动电流[9]，控制可调衰减器的衰减量来实现自身高功率保护。该电路能够很好地实现接收机强功率防护的目的，但较普通 PIN 限幅体积有所增加。

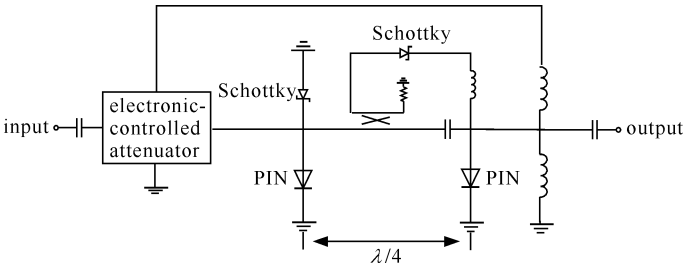

Fig. 6　Active limiter

图 6　主动式限幅器

2　高功率注入式测试平台搭建

对设计的限幅器除了进行小信号 S 参数的测量外，还须进行高功率注入式实验，以检测限幅器高功率下的各项性能指标[10]。项目中搭建的高功率注入式测试平台如图 7 所示。该平台可进行脉冲、连续波实验，除了可以测量限幅器功率容量、起限电平、限幅电平等指标外，还可以测量限幅器的高功率响应速度及恢复时间。

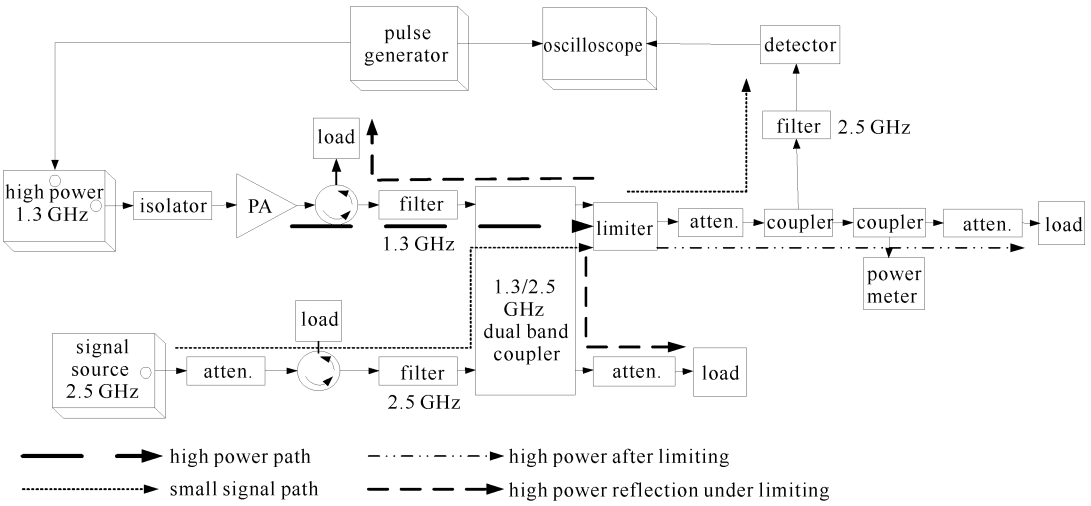

Fig. 7　Injection experiment platform of high power microwave

图 7　高功率微波注入式测试平台

该平台高功率测试注入信号分为两路：一路为大功率信号，一路为有用小信号。具体测量方案如下。

(1)功率容量、起限电平、限幅电平测量：当注入功率处于限幅器线性工作区时，信号不衰减，因而通过从功率计读取的功率数值应与注入的高功率线性相关(考虑具体的链路损耗)。当注入功率达到限幅器起限电平时，限幅器开始工作，将一部分能量通过耦合器返回，此时功率计测得的功率量值与注入功率将出现非线性，因此该时刻注入功率量值即为限幅器的起限电平。接着逐步增加限幅器的注入功率，结合功率计测得的一系列功率值，即可绘出限幅器的输入功率与限幅电平的功率曲线。

(2)响应速度、恢复时间测量：使用的小信号为特定功率电平的连续波，当限幅器处于线性工作区时，该信号可以通过一定量的衰减经耦合、检波到达示波器。示波器检测的信号电平在限幅器线性工作情况下为稳定值，不受注入高功率信号电平的影响。当高功率达到限幅器的起限电平时，限幅器开始对输入信号进行衰减，此时示波器测得的小信号电平将开始降低，该响应可以协同功率计测得的高功率量值共同给出测量得到的限幅器的起限电平，提高测量精度。由于使用的脉冲发生器同时将脉冲信号送入高功率微波源和示波器，因此，可以由脉冲送入时刻与示波器电平出现衰减的时刻的时间差，得出限幅器的响应速度(考虑系统链路的群时

延)。同理可以测出当高功率消失至限幅器恢复正常插损 3 dB 时限幅器的恢复时间。

如果使用大功率信号和有用小信号同频测试的设计方案,将会有以下缺点:(1)由于使用的高功率信号很容易经反射和耦合进入小信号源和示波器,因而对仪器的毁伤威胁较大;(2)同频测试小信号几乎完全湮没在大信号下,这给小信号检波带来困难,同时也增加了系统的测量误差。

鉴于设计的限幅器工作频带较宽,且小信号的目的主要是测量限幅器的时间特性,因此最终采用大小信号异频的测试方案[11]。大功率信号采用限幅器指标要求的频率 1.3 GHz,小信号采用 2.5 GHz。异频测试的设计方案由于采用双频耦合器及滤波,因而大大提高了高功率信号和射频小信号源的隔离度,并且为小信号检波带来了方便。

3 结 论

本文通过在分析 PIN 二极管的设计指标及影响其限幅性能因素的基础上介绍了无源检波式限幅器和主动式限幅器设计。为了测试设计的限幅器的功率容量、限幅电平、尖峰泄露、响应速度及恢复时间等特性,搭建了高功率实验平台。该平台采用大小信号异频工作,提高了测试系统的隔离度,保证了测试设备的安全性,并且增加了系统测量的可靠性。

参考文献:

[1] 钟福如,梁斌. 宽带大功率限幅器小型化研究[J]. 电子元件与材料, 2007, **26**(7):66-68. (Zhong Furu, Liang Bin. Research on wideband high-power limiter with small size. *Electronic Components and Materials*, 2007, **26**(7):66-68)

[2] 余稳,聂建军,郭杰荣,等. PIN 二极管的高功率微波响应[J]. 强激光与粒子束, 2002, **14**(2):299-301. (Yu Wen, Nie Jianjun, Guo Jierong, et al. Response of the PIN diode to the high power microwave. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(2):299-301)

[3] 王波,黄卡玛. 温度对 PIN 二极管限幅器功率响应特性的影响[J]. 强激光与粒子束, 2008, **20**(4):645-648. (Wang Bo, Huang Kama. Effect of temperature on power response of PIN diode limiter. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(4):645-648)

[4] 周敏,郭庆功,黄卡玛. PIN 限幅二极管结温对尖峰泄漏的影响[J]. 强激光与粒子束, 2008, **20**(2):277-280. (Zhou Min, Guo Qinggong, Huang Kama. Effect on peak leakage caused by junction temperature rise in PIN diode limiter. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(4):277-280)

[5] 王波,黄卡玛. 大功率 PIN 二极管限幅器对电磁脉冲后沿响应的分析[J]. 强激光与粒子束, 2008, **20**(7):1177-1181. (Wang Bo, Huang Kama. Response of high power PIN diode limiter to electromagnetic pulse descending edge. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(7):1177-1181)

[6] Carroll J M. Performance comparison of single and dual stage MMIC limiters[C]//IEEE MTT-S Digest. 2001:1341-1344.

[7] 马海棠. 一种 DC～4 GHz 微波限幅器的设计方法[J]. 科技信息, 2010(19):137. (Ma Haitang. Design method for DC～4 GHz microwave limiter. *Science and Technology Information*, 2010(19):137)

[8] Skyworks Inc. PIN limiter diodes in receiver protectors[R/OL]. Skyworks Inc. http://www.skyworksinc.com.

[9] Coaker B M, Dowthwaite D M. Planar limiters and receiver protectors[C]//European Microwave Conference. 2007:1684-1687.

[10] Chen Dong, Xu Liming, Zhang Bisheng, et al. Research on the effect of high power microwave on low noise amplifier and limiter based on the injection method[J]. *J Electromagn Anal Appl*, 2010, **2**(2):111-115.

[11] Looney J, Conway D, Bahl I. An examination of recovery time of an integrated limiter/LNA[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2004, **5**(1):83-86.

Design and test scheme of high power PIN limiters

Zhang Haiwei, Shi Xiaowei, Xu Le, Wei Feng

(*National Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology*, *Xidian University*, *Xi'an* 710071, *China*)

Abstract: A high power passive limiter based on PIN diode is presented. The main factors affecting its performance, such as power capability, limiting levels, peak leaking, response time, and recovery time, are presented. A passive PIN limiter using Schottky detection and an active limiter are realized based on microstrip line. The simulated results indicate that the threshold level and the limiting level of the passive limiter are about −3 dBm and 15 dBm, respectively, and it can withstand peak pulses of about 60 dBm. A high power measurement platform is established to measure the performance of the designed limiters. High isolation between high power signal and small signal is obtained using dual-band dual-path coupling method so that periodic pulsed and continuous wave high power measurement can be carried out reliably.

Key words: high power; PIN limiter; passive detector limiter; active limiter; high power measurement platform