

基于巴特沃斯低通滤波器的毫米波 宽带低插损限幅器研究

姚常飞^{1,2}, 周 明², 罗运生², 吴 刚², 许从海²

(1. 南京电子器件研究所微波毫米波单片集成和模块电路重点实验室, 江苏南京 210016;

2. 南京电子器件研究所微波毫米波模块电路事业部, 江苏南京 210016)

摘 要: 基于巴特沃斯(最大平坦型)低通滤波器模型,研究了毫米波限幅器在小信号时的等效电路.结合限幅器电路电磁场仿真模型,分析限幅二极管物理模型的寄生参数和键合金丝电感,提取相应的S参数,以设计限幅器的阻抗匹配网络,研制出了Ka波段全频段低插损限幅器.在26~40GHz,测得限幅器小信号插损小于4.3dB,最小插损2.2dB,驻波比小于1.95:1;当输入的连续波功率为0.5W时,限幅输出功率小于10.5dBm;整个限幅器尺寸为20×12×6mm³,限幅器性能达到国外同类产品水平.

关键词: 毫米波; 等效电路模型; 巴特沃斯低通滤波器; 限幅器

中图分类号: TN61 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2013)09-1809-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.09.022

Research on Millimeter Wave Broad-Band and Low Insertion Loss Limiters Based on Butterworth Low Pass Filter

YAO Chang-fei^{1,2}, ZHOU Ming², LUO Yun-sheng², WU Gang², XU Cong-hai²

(1. Science and Technology on Monolithic Integrated Circuits and Modules Laboratory, Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing, Jiangsu 210016, China;

2. Department of Microwave and Millimeter Wave Modules, Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract: Equivalent circuit of a millimeter wave limiter is analyzed based on Butterworth (maximally flatness) low pass filter model. Considering the parasitic components of the limiter diodes, the whole limiter physical structure is setup. Diode parasitic parameters, bonding wire inductances, and complete limiter circuit matching networks are analyzed with EM software. A Ka full-band low insertion loss limiter is realized, the measured small-signal insertion loss is lower than 4.3dB in 26~40GHz, the lowest insertion loss is 2.2dB, and the VSWR is better than 1.95:1. At large signal condition with input continuous wave power of 0.5W, the peak leakage power is lower than 10.5dBm. The dimension of the limiter is 20×12×6mm³, and its performance achieves the level of similar foreign products.

Key words: millimeter wave; equivalent circuit model; butterworth low pass filter; limiter

1 引言

限幅器作为一种重要的微波控制器件已被广泛应用于各类微波毫米波接收系统中,主要防止雷达发射机的发射功率和外界的功率耦合输入到接收机前端而烧毁前级电路元件.限幅器作为一种自动控制式衰减器,在低输入功率时没有衰减,当信号功率增加到规定值时,将产生很大的衰减,这个规定值称为门限电平,此后输入功率继续增大时,输出功率仍然保持不变.限幅器有多种类型,如:气体放电管限幅器、铁氧体限幅器、次级电子倍增限幅器、YIG限幅器^[1~6],以及现在普遍采用的固态器件限幅器^[7~26].在微波毫米波频段,由于小

型化、集成化等要求,现以固态器件PIN二极管类型的限幅器为主.固态限幅器按电路结构分主要有波导加载基片式、波导腔中直接并联二极管式、混合集成式、单片式等类型.按有无外加偏置,分为无源限幅器和有源限幅器,有源限幅器在限幅过程中,通过检波二极管提供额外的偏压,小信号时,检波电压不足以使PIN管导通,对小信号不产生衰减;大信号时,检波电压足够大使PIN二极管导通,从而保证对大功率信号进行快速的衰减,实现较好的限幅效果.按照级数,分为单级和多级限幅器,采用多级限幅二极管的结构能承受更大的功率容量,一般前级限幅二极管门限电平较高,后级限幅二极管门限电平较低,这样能使限幅器实现较高的输入功率

和较低的限幅输出电平.集成检波器式限幅器和多级限幅器的缺点是电路设计复杂,成本相对较高.

目前射频与微波限幅器技术比较成熟,国内在 L, S, C, X, Ku 等低频段的研究报道很多^[18~20],其中南京电子器件研究所已有工作到 Ku 波段的商用限幅器产品.国外在微波频段的研究文献与产品也很多^[7~17],如 Triquint 公司的一款工作频带为 3~26GHz 的 MMIC 限幅芯片,其基本覆盖了整个微波频段.在工作频率、带宽和功率容量上,国外的报道和商用产品都要优于国内的水平.从上世纪 80 年代,国外固态限幅器的研究工作从微波频段向毫米波频段发展,研究文献有很多,出现了如:8mm、5mm、3mm 等波段的限幅器报道^[18~21].文献报道的限幅器最高工作频带 93.5~95.5GHz^[3]、承受脉冲峰值功率 1kW、插损小于 2.5dB;查阅到的商用毫米波限幅器产品公司主要有 CPI、Cemex 和 e2v 等,它们列出了最高工作频率到 Ka 波段的限幅器产品.在 Ka 波段,CPI 和 e2v 公司的产品工作带宽相对很窄,在 1GHz 带内插损小于 1.6dB,驻波小于 1.5:1;Cemex 公司列出的限幅器产品主要是全波段的,在 26~40GHz,插损典型值为 3.0dB,驻波小于 2:1.在国内,受限幅二极管最高工作频率限制,缺少相关的研究工作,还未见到有关毫米波限幅器的研究报道.

2 限幅器分析与设计

本文研制的 Ka 波段全频段混合集成限幅器采用无源多级 PIN 二极管结构,根据选用的二极管管芯外形,考虑把 PIN 二极管并联于微带电路中.为实现全波段特性,以集总参数巴特沃斯低通滤波器电路为原型,采用两只 PIN 二极管并联构成宽带低通滤波网络,通过分析二极管的 P 层、N 层和 I 层物理结构,建立其场仿真模型,提取相应的 S 参数,拟合出二极管寄生参数值,结合键合金丝电感参数分析,优化金丝电感和匹配网络,研制出了 Ka 波段全频段高性能限幅器.

2.1 金丝互连特性分析

金丝广泛应用于微波毫米波互连电路中,其模型参数获取通常有以下几个基本途径:

(1)全波分析;(2)准静态分析;(3)测量法.本文采用三维电磁场分析软件 HFSS 对限幅器中

的金丝键合互连特性进行建模分析和仿真优化,将金丝键合互连近似等效为一个串联电阻、一个串联电感和输入输出端并联电容组成的低通滤波器网络如图 1 来表示,双丝时忽略了互感和耦合电容效应.下面以直径为 18 μm (考虑到二极管的金丝键合点为直径 28 μm)、拱高为 0.2mm 的金丝为例加以分析,基于去嵌入计算

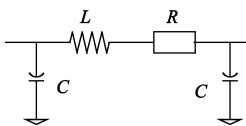


图1 金丝等效电路模型

方法如图 2,得到场仿真 S 参数,通过电路软件拟和 S 参数,得到单丝和双丝情况下的等效电路模型电阻、电容分别为 0.25 Ω 、0.016pF 和 0.2 Ω 、0.011pF,当金丝跨距变化时金丝等效模型的电容值可以当成是不变量^[22],电阻值也基本保持不变,金丝跨距和等效电感的关系曲线如图 3,可以看出在同样的条件下,双丝电感量比单丝电感量小,金丝跨距越小电感量也越小,通过改变金丝数目和跨距可以实现不同的电感值,在后文限幅器设计时,低通滤波器的等效电感完全可以由金丝等效得到,寄生的电阻和电容很小,在 Ka 波段可以忽略不计.

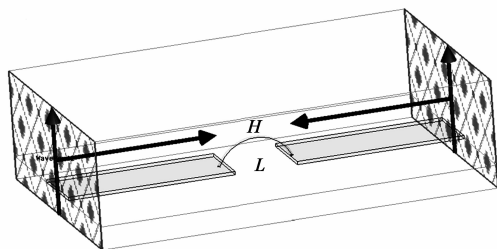


图2 单金丝仿真模型

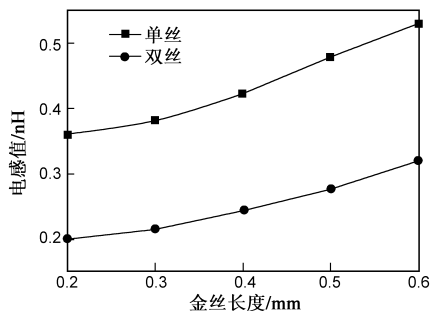


图3 金丝电感和跨距变化关系

2.2 限幅二极管模型分析

受现有的高频限幅二极管限制,选用了 Skworks 公司的 CLA4601-000 硅 PIN 限幅二极管管芯,商家推荐工作频率为 30GHz 以内.该二极管 I 层厚度 1 μm ,零偏置结电容为 0.12pF,总的串联电阻为 2.5 Ω ,最大连续波承受功率 2W.限幅二极管的截面图如图 4,该芯片是典型的台式结构,P 层和 N 层具有高的掺杂浓度,以减小接触电阻,一般 P 层电阻在毫欧级别,N 层电阻在几十毫欧级别,在大多数情况下,该部分电阻是可以忽略不计的.I 层处于 P 层和 N 层之间,叫做本征层,是不掺杂层,在没有偏置的情况下,其电阻值在兆欧姆量级.限幅二极管的各层电阻值可以通过以下公式计算得到,其中 ρ_{layer} 为电阻率、 T_{layer} 为厚度、 A_{layer} 为面积.

$$R_{\text{layer}} = \rho_{\text{layer}} \times T_{\text{layer}} / A_{\text{layer}}$$

限幅二极管等效电路如图 5, R_s 为二极管串联电阻、 C_p 为寄生电容、 C_j 为零偏置结电容、 R_j 为二极管结

电阻.

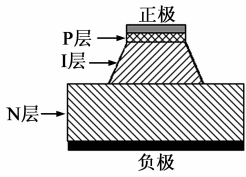


图4 二极管截面图

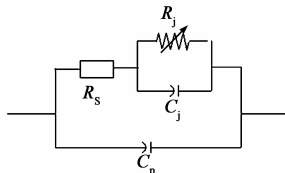


图5 二极管等效电路

为提取二极管 CLA4601-000 的各类寄生参数,在场仿真软件中建立了该管子的物理结构仿真模型如图 6,其物理结构材料参数设置如表 1, N 型和 P 型重掺杂硅材料采用介电常数为 11.9,采用电导率为 4.1×10^7 S/m 的金材料模拟; I 型本征硅介质层采用介电常数为 11.9,其在大小信号时电导率分别为 1.75×10^2 S/m(电导率根据二极管串联电阻公式 1 得到)和电导率为零的材料模拟.采用的金丝直径为 $18 \mu\text{m}$ 、拱高为 0.2mm,跨距为 0.3mm,通过如图 3 所示的去嵌入阻抗场计算方法,得到二极管和金丝的 S 参数文件,根据等效电路模型,通过拟合 S 参数幅度和相位曲线,获得二极管的等效寄生集总参数数值, R_s 为 0.12Ω 、 C_p 为 0.008pF .

表 1 二极管材料参数设置

材料	介电常数	损耗角正切	电导率(S/m)
P 型重掺杂 Si 层	11.9	0	4.1×10^7
N 型重掺杂 Si 层			4.1×10^7
I 型 Si 本征层			大信号时: 1.75×10^2 小信号时:0

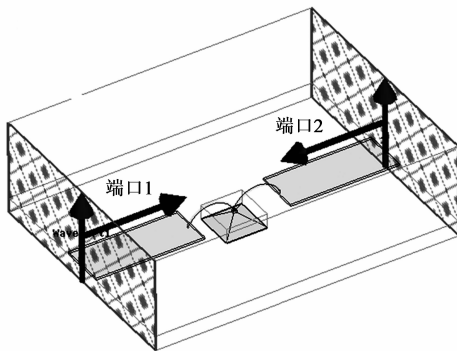
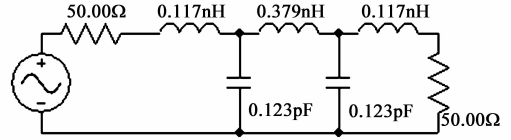


图6 二极管场仿真模型

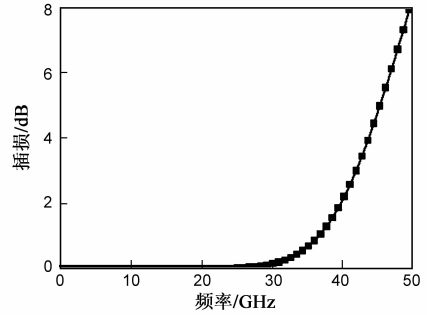
2.3 限幅器设计

为实现限幅器的宽频带,选用了如图 7(a)所示的串联电感作为第一元件来构成低通滤波器,低通滤波器的并联电容数与二极管数相同,因此用电感作为第一元件的滤波器要比电容作为第一元件的滤波器多两个电感元件,因此在同样二极管数目的情况下,该结构能够实现更高的隔离度^[7].本文以 5 阶巴特沃斯低通滤波器为原型,设计了 3dB 带宽截止频率为 42GHz 的低通滤

波器,滤波器原理图和 S 参数仿真曲线如图 8,该滤波器并联电容为 0.123pF ,如果要进一步提高滤波器的截止频率,需要进一步降低并联电容值.



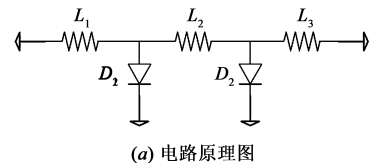
(a) 低通滤波器集总参数原型



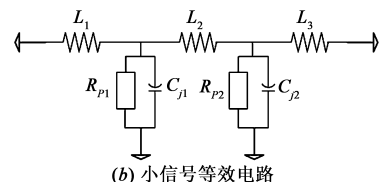
(b) S21 仿真曲线

图7 巴特沃斯低通滤波器

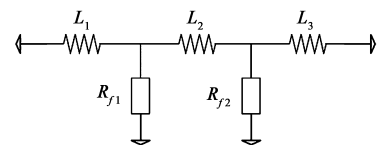
基于上述低通滤波器模型的讨论,设计了如图 8 所示的限幅器等效电路.限幅器电感 L 由键合金丝得到,二极管在忽略寄生参数的情况下,小信号时等效为电阻 R_p 和 C_j 并联,一般 R_p 为兆欧姆量级,在忽略不计的情况下,限幅器小信号模型就和低通滤波器一样,其截止频率主要就由二极管的结电容决定,该等效低通滤波电路的截止频率就取决于二极管零偏置结电容,据此本文选用了可获得低结电容限幅二极管管芯;当二极管在大信号情况下时,二极管就等效成几欧姆量级的电阻,这时限幅器对信号近似全反射,实现限幅的效果.



(a) 电路原理图



(b) 小信号等效电路



(c) 大信号等效电路

图8 两级PIN二极管限幅器

基于上文金电感定量分析,结合限幅器等效电路模型分析,巴特沃斯低通滤波器的第一级电感 0.155nH 由直径为 $18\mu\text{m}$ 、拱高为 0.1mm 、跨距 0.3mm 、间隙 0.2mm 的金丝近似等效得到,电感量的进一步减小受最小跨距和键合金丝直径所限(其受管芯物理尺寸和键合点直径等限制); 0.379nH 电感由直径为 $18\mu\text{m}$ 、拱高为 0.2mm 、跨距 0.3mm 的金丝等效得到;并联电容由限幅二极管结电容近似等效得到.在电路整体优化设计时,由于二极管结电路相对偏大,特别需要考虑二极管寄生参数对限幅器高频性能的影响,通过引入阻抗补偿匹配网络,改善器件等效电容和金丝电感偏大的问题,采用场和路相结合的分析方法设计限幅器.基于上文嵌入法提取的二极管S参数文件(包括键合金丝在内),建立限幅器的小信号电路仿真模型如图9,在ADS电路仿真软件中,以限幅器的小信号插损和驻波为优化目标,采用S参数仿真器优化设计阻抗匹配网络的初值.为提高限幅器的小信号仿真精度,基于路仿真得到的参数初值,在场仿真软件中建立了限幅器的整体场仿真模型如图10,进一步微调限幅器匹配阻抗线的宽度和长度,以实现所要求的插损和驻波指标,如果仿真数据不满足设计目标,重复上述场和路相结合的设计过程,直到仿真得到的技术指标满足要求为止.限幅器电路板采用介质基片 Duroid 5880($h = 0.127\text{mm}$ 、 $\epsilon_r = 2.2$ 、损耗角正切 $\text{tg}\delta = 0.01$);输入输出端采用超宽带电容隔直,在 40GHz 以内,单个电容插损小于 0.5dB ;直流回路采用频率高达 40GHz 的射频扼流电感到地实现;输入输出接口为直径是 0.3mm 的绝缘子针.

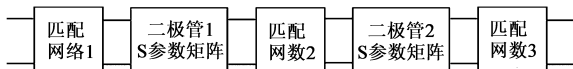


图9 小信号路仿真

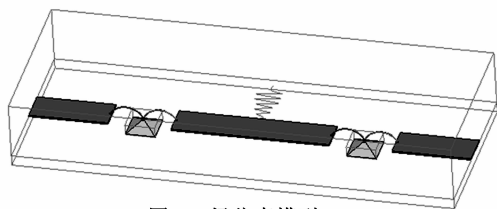


图10 场仿真模型

3 限幅器测试

限幅器测试使用的网络分析仪为 Agilent N5245A ($10\text{MHz} \sim 50\text{GHz}$),仿真和测得的限幅器小信号插损和驻波比如图11,从仿真数据可知,在工作频带高端时,限幅器场仿真得到的插损快速增加,与图7基于集总参数得到的巴特沃斯低通滤波器和测试结果变化趋势相似,说明高频端插损迅速变大主要是限幅管结电容偏

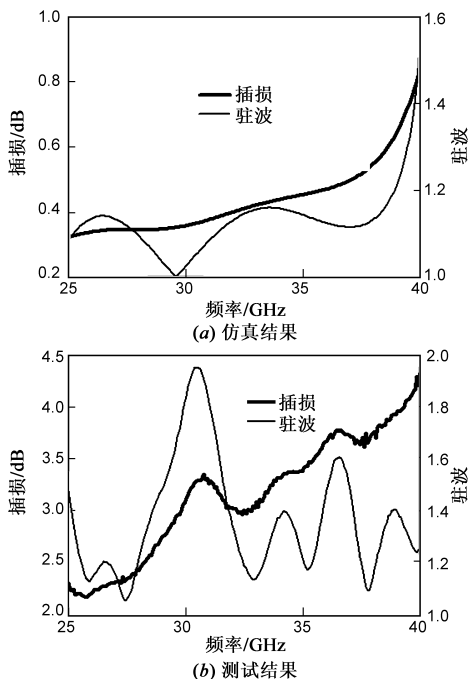


图11 小信号S参数

大的原因.在 $26 \sim 40\text{GHz}$,测得限幅器插损小于 4.3dB ;整个频带内驻波比优于 $1.95:1$.大信号射频源由信号源外加放大获得,当限幅器输入的射频功率在 0.5W 左右时,限幅输出功率曲线如图12,可以看出,在现有的大功率测试条件下,限幅器限幅输出功率为 $6.5 \sim 10.5\text{dBm}$.限幅器实物如图13.

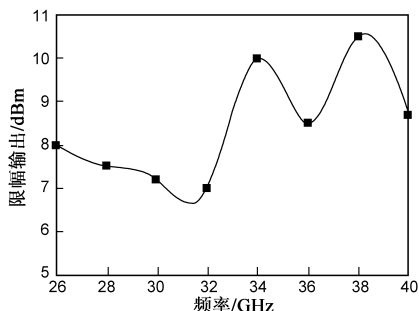


图12 限幅输出电平测试图



图13 实物图

从表2同类限幅器产品比较看出,本文研制的限幅器驻波、插损和限幅输出功率指标达到了能查阅到的

国外同频段产品水平,插损和限幅输出功率指标甚至可与商用的窄带限幅器相比拟.对于限幅器做成批量产品时产生的一些不致性差别,可通过微调金丝弧度以弥补指标上的差别.取得的较好技术指标论证了本

文限幅器设计方法的合理性和有效性,设计方法也能很好地指导其它频段限幅器和 PIN 管类电路如开关、移项、衰减器等功能模块电路的设计.

表 2 本文与国外商用限幅器产品比较

公司/文献	型号	工作频率(GHz)	插损(dB)	驻波比	限幅输出功率(测试条件)
本文	—	26 ~ 40	最大值 4.3 最小值 2.2	最大值 1.95:1 最小值 1.1:1	最大值 10.5dBm(0.5W)
Cemex	CLM264030	26 ~ 40	典型值 3.0	最大值 2:1	13dBm@25℃(1W)
	CLM353835	35 ~ 38	最大值 3.5	最大值 2:1	13dBm@25℃(1W)
e2v	BS20781	Ka(带宽 1GHz)	1.5	1.4:1	50mW(50W,4% 占空比)
CPI	VDA1523	34.5 ~ 35.5	最大值 1.6	最大值 1.4:1	75mW(80W,0.2% 占空比)

4 结论

基于巴特沃斯低通滤波器模型,研究了毫米波限幅器在小信号状态时的等效电路模型和键合金丝电感值.考虑到二极管各种寄生参数对高频特性的影响,采用场和路相结合的分析方法,分析研究限幅器性能,研制出了 Ka 波段宽带低插损限幅器.在 26 ~ 40GHz,限幅器小信号插损小于 4.3dB,驻波比小于 1.95:1,当输入连续波功率为 0.5W 时限幅输出功率小于 10.5dBm,整个限幅器尺寸为 $20 \times 12 \times 6\text{mm}^3$.本文研制的限幅器达到了国外同类商用限幅器产品的性能,可以替代国外进口产品.

参考文献

- [1] GOLDIE H. A 2-kW average power X-band receiver protector [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1977, 24(1): 53 - 55.
- [2] GOLDIE H, PATEL S. An RF-primed all-halogen gas plasma microwave high power receiver protector [A]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest [C]. Dallas: IEEE, 1982. 69 - 71.
- [3] GOLDIE H. A high power broadband millimeter-wave switch and receiver protector [A]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest [C]. Ottawa: IEEE, 1987. 354 - 356.
- [4] UEBELE G S. Characteristics of ferrite microwave limiters [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1959, 7(1): 18 - 23.
- [5] CARLISLE T P. X-band high-power multipactor receiver protector [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1978, 26(5): 345 - 347.
- [6] STITZER S N, CARTER P S, GOLDIE H. A high power X-band frequency selective passive YIG limiter [A]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest [C]. San Diego:

IEEE, 1977. 528 - 531.

- [7] SARKAR B K. Cutoff frequency of microwave coaxial multi-mode limiter [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1982, 29(3): 463 - 464.
- [8] SEYMOUR D J, HESTON D D, LEHMANN R E. Monolithic MBE GaAs PIN diode limiter [J]. IEEE Microwave and Millimeter-Wave Monolithic Circuits, 1987, 87(1): 35 - 37.
- [9] KATOK V B, KAMANKO A A, SOLOVYOV D A. The self-controlled MM-band limiter of power [A]. 9th International Microwave and Telecommunication Technology Conference [C]. Crimean: IEEE, 1999. 85 - 86.
- [10] DEVLIN L M, DEARN A W, BEASLEY P D L. A monolithic, dual channel, 0.5 to 20GHz limiter [A]. Proceedings of the European Microwave Conference [C]. Paris: IEEE, 2000. 172 - 175.
- [11] SMITH D G, HSTON D D, HEIMER H J, et al. Designing reliable high-power limiter circuits with GaAs PIN diodes [C]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest [C]. Seattle: IEEE, 2002. 1245 - 1247.
- [12] BAHL I J. 10W CW broadband balanced limiter LNA fabricated using MSAG MESFET process [J]. International Journal of Microwave and Millimeter-Wave Computer-Aided Engineering, 2003, 13(2): 118 - 127.
- [13] ARMSTRONG A L, ANANAD Y. A limiter for high-power millimeter-wave system [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques, 1983, 83(2): 238 - 241.
- [14] SILLARD G, HENRY E R. Active high power limiter a MM wavelengths [A]. 15th European Microwave Conference [C]. Paris: IEEE, 1985. 593 - 598.
- [15] KIRILLOV A V, SMIMOV V A, ROMANOV L P. Broadband semiconductor protection devices for 8-mm waveband [A]. 15th International Microwave and Telecommunication Technology Conference [C]. Crimean: IEEE, 2005. 183 - 184.
- [16] GUDKOVA N B, SHNITNIKOV A S. Millimeter-wave

- waveguide diode limiter [A]. 16th International Microwave and Telecommunication Technology Conference [C]. Crimean: IEEE, 2006. 123 – 124.
- [17] YANG S S, KIM T Y, KONG D K, et al. A novel analysis of a Ku-band planar PIN diode limiter [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2009, 57(6): 1447 – 1460.
- [18] 钟玮, 丁玉霞. 1-18GHz 超宽带限幅器 [J]. 固体电子学研究与进展, 1998, 18(3): 340.
ZHONG Wei, DING Yu-xia. 1-18GHz super-broadband limiter [J]. Research & Progress of SSE, 1998, 18(3): 340. (in Chinese)
- [19] 顾晓春. X 波段小型化无源限幅器的研究 [J]. 现代雷达, 2005, 27(8): 59 – 61.
GU Xiao-chun. Research on X-band passive limiter with small size [J]. Modern Radar, 2005, 27(8): 59 – 61. (in Chinese)
- [20] 陈新宇, 蒋幼泉, 等. 砷化镓 PIN 管单片限幅器 [J]. 固体电子学研究与进展, 2006, 26(4): 573.
CHEN Xin-yu, JIANG You-quan, et al. GaAs PIN limiter MMIC [J]. Research & Progress of SSE, 2006, 26(4): 573. (in Chinese)
- [21] 金杰, 冯军, 等. 0.18 μm CMOS 10Gb/s 光接收机限幅放大器 [J]. 电子学报, 2004, 32(8): 1393 – 1395.
JIN Jie, FENG Jun, et al. 0.18 μm CMOS limiting amplifier for 10Gb/s optical receiver [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(8): 1393 – 1395. (in Chinese)

- [22] SUTOMO A, CAFARO N G, LASKAR J, et al. Experimental modeling repeatability investigation and optimization of microwave bond wire interconnects [J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2001, 24(4): 595 – 603.

作者简介



姚常飞 男, 1982 年出生于江苏省常州市, 博士, 工程师, 现就职于南京电子器件研究所, 在国内外期刊发表科研论文近二十余篇. 研究方向毫米波亚毫米波电路与系统.
E-mail: yaocf1982@163.com

周 明 男, 1974 年出生于江苏省南京市, 高级工程师, 现就职于南京电子器件研究所, 研究方向微波毫米波电路与系统.
E-mail: zright@sina.com

罗运生 男, 1944 年出生于辽宁省沈阳市, 研究员, 现就职于南京电子器件研究所, 研究方向微波毫米波电路与系统.

吴 刚 男, 1965 年出生于江苏省南京市, 工程师, 现就职于南京电子器件研究所, 研究方向微波毫米波频率源.

许从海 男, 1981 年出生于江苏省淮安市, 工程师, 现就职于南京电子器件研究所, 研究方向微波毫米波多功能组件.