

一种基于 MEMS 的小型化双通带宽带滤波器芯片

濮泽宇^{1,2}, 万晶^{2,3}, 王霄^{2,3}, 李跃华¹, 梁晓新^{2,3}

(1.南京理工大学, 江苏 南京 210094; 2.昆山微电子技术研究院, 江苏 昆山 215347;

3.中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

摘要: 基于 Micro-Electro-Mechanical System(MEMS)工艺, 采用双层谐振腔滤波结构, 分析并设计了一种基于 MEMS 的硅基 Substrate Integrated Waveguide(SIW)双通带宽带带通滤波器芯片。设计的滤波器芯片在 21.25~29 GHz 以及 43~47.5 GHz 双通带频带内插入损耗小于 3 dB, 相对带宽分别为 30% 以及 10%, 带外抑制度大于 20 dB, 并且在双通带间产生了零点, 尺寸仅为 4.2 mm×1.1 mm×0.8 mm。该滤波器是平面堆叠结构, 具有体积小、频带宽、易集成等优点, 有较好的应用价值。

关键词: 双通带; 宽带; 带通滤波器; SIW; MEMS

中图分类号: TN713

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211351

中文引用格式: 濮泽宇, 万晶, 王霄, 等. 一种基于 MEMS 的小型化双通带宽带滤波器芯片[J]. 电子技术应用, 2021, 47(7): 48-51, 56.

英文引用格式: Pu Zeyu, Wan Jing, Wang Xiao, et al. A miniaturized MEMS-based dual passband broadband filter chip[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(7): 48-51, 56.

A miniaturized MEMS-based dual passband broadband filter chip

Pu Zeyu^{1,2}, Wan Jing^{2,3}, Wang Xiao^{2,3}, Li Yuehua¹, Liang Xiaoxin^{2,3}

(1.Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;

2.Institute of Microelectronic Technology of Kunshan, Kunshan 215347, China;

3.Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: This paper analyzes and designs a silicon based substrate integrated waveguide(SIW) dual passband broadband bandpass filter chip based on Micro-Electro-Mechanical System(MEMS) process with double layer resonant cavity filter structure. The designed filter chip has an insertion loss of less than 2 dB in the 23~29 GHz and 43~47 GHz dual passband bands with relative bandwidths of 23% and 9%, respectively, and an out-of-band suppression of more than 20 dB, and generates a zero point between the dual passbands with a size of only 4.2 mm×1.1 mm×0.8 mm. The filter is a planar stacked structure, with the advantages of small size, wide band and easy integration, which has good application value.

Key words: dual-passband; broadband; bandpass filter; SIW; MEMS

0 引言

在通信产业快速发展的大环境下, 迫切要求通信系统向更小、更易集成、更多适用频段的方向发展。滤波器作为无线通信系统中不可或缺的组成部分, 起到滤除系统杂波的作用^[1], 且数量要求多, 其体积决定了整个系统的体积和成本。在微波频段多以 PCB 板级滤波器为主, 应用到毫米波频段后其表面金属结构以及开放的电磁场, 使得 PCB 板级滤波器损耗过大, 因此多以腔体结构滤波器为主, 但腔体滤波器体积巨大, 不适应于 5G 小型通信系统终端应用中。此时, 基于 MEMS 工艺的滤波器芯片应运而生, MEMS 工艺新增了诸如体微机械加工、表面微机械加工等工艺, 融合了各个学科

的尖端技术, 可与 Integrated Circuit(IC)工艺相兼容。采用 MEMS 工艺制备的滤波器, 具有尺寸小、集成度高等诸多优点。

在 MEMS 滤波器谐振腔研究方面, SIW 谐振腔结构凭借与矩形波导极高的相似性及其更便捷的实现方式, 成为了目前 MEMS 滤波器的主流设计结构。在此结构基础上, 文献[2-3]通过中间规则排布通孔的耦合方式, 实现了多款单通带 MEMS 滤波器芯片, 但其相对 MMIC 芯片而言巨大的尺寸及其单一的应用频段无法满足目前小型化、多功能的应用发展需求。因此, 在小型化的基础上实现多频带应用成为 MEMS 滤波器芯片设计的一个全新方向。

为此,本文提出了一种新型的小型化双通宽带滤波器芯片,基于 MEMS 工艺,采用双层半模 SIW 谐振腔,并在介质层间刻蚀 L 型槽线的方法实现,在维持滤波器小型化的基础上,拓宽了双通带带宽,且阻带抑制良好。

1 滤波器分析与设计

1.1 滤波器谐振腔结构设计

本文采用 SIW(基片集成波导)谐振腔,通过两排或者多排周期排列的金属通孔代替金属波导侧壁,并与上下表面的金属导体密闭形成,属于传输线结构,但是又具有与金属波导相似的传播特性,具有传输损耗小、Q 值高等优点,同时易于平面集成,其谐振腔模型如图 1 所示,其中介质基板厚度为 h ,金属化过孔直径为 d ,两行金属化过孔中心间距为 W_{SIW} ,相邻过孔中心间距为 s 。

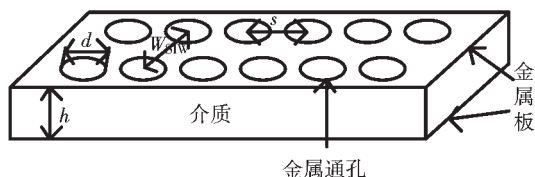


图 1 SIW 谐振腔模型图

SIW 谐振腔的辐射损耗和反射损耗主要由金属通孔的尺寸和相邻金属孔之间的距离决定,减小相邻通孔之间的间距可以减小孔间的能量泄露,从而有效地减小辐射损耗,为了尽量的减小损耗,尺寸遵循 $d < 0.2 \lambda_g$, $d/W_{\text{SIW}} < 0.2$, $d/s \geq 0.5$ 的设计原则。

在电磁能量损耗较小的情况下,电磁波被限制在两排金属通孔之间传播,此时,SIW 谐振腔就可以与填充相同介质的矩形波导等效。

TM 和 $TE_{mn}(n \neq 0)$ 波在 SIW 谐振腔中传输时,会感应出沿侧壁纵向流动的表面电流,而相邻金属孔之间的缝隙会阻断表面电流的流动,因此 TM 和 TE_{mn} 波不能在 SIW 谐振腔中传播^[4]。当 SIW 谐振腔中传播 TE_{m0} 模式的波时,电流沿着金属孔上下流动而没有被阻断,因此电流可以传输。

在 W_{SIW} 已知的情况下,可以计算出等效矩形波导的宽度 W_{RWG} 。传播主模 TE_{10} 时,截止频率为:

$$f_{cTE10} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon} \times W_{\text{RWG}}}$$

SIW 谐振腔的主模截止频率由宽边尺寸 W_{SIW} 决定。利用普通矩形波导的等效阻抗公式可以表示 SIW 谐振腔的等效阻抗为:

$$Z_0 = \frac{h}{W_{\text{RWG}}} \times \frac{\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2W_{\text{RWG}}}\right)^2}}$$

1.2 滤波器馈线结构选型

馈线结构作为滤波器输入输出结构,在不同需求下

的选择有所不同。共面波导常用传输线转换结构有微带线和共面波导两种,其中微带线在传输信号时,电磁场主要分布在介质层中,其导体带厚度对特性阻抗无明显影响,适用于窄带结构设计;共面波导相较微带线,其导体带精度要求更高,厚度影响量约为微带线 10 倍,传输过程中,电磁场大量分布在空气中,因此有效介电常数比同材质微带线低,同时,相较微带线传输更接近准 TEM 波,色散少,适用于宽带设计,与本次设计要求相符。

共面波导结构作为输入输出转换结构分为背面无接地面和背面有接地面两种不同结构,在相同结构尺寸情况下,背面不接地共面波导的特性阻抗受槽线宽度及导体带宽度影响很大^[5],而背面接地共面波导的特性阻抗在槽线宽度大于 0.5 mm 后变化很小;而且在结构尺寸相同时,前者的特性阻抗比后者的要大^[6],因此本文选择背面接地共面波导作为滤波器馈线结构。背面接地共面波导主要影响其特性阻抗的参数有:导体层厚度 T ,导体带宽度 W ,两边槽线宽度 G ,介质层厚度 h ,以及介质层相对介电常数 ϵ 和损耗角正切 $\tan\delta$ 等,背面接地共面波导结构如图 2 所示。

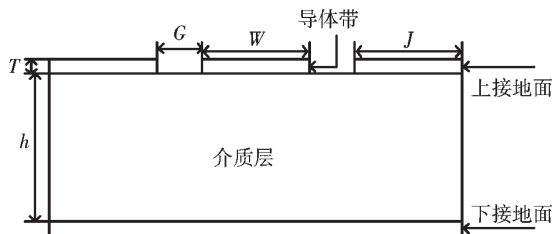


图 2 背面接地共面波导传输线模型图

在背面接地共面波导传输线的基础上,本文通过 HFSS 软件进行仿真设置。Port 宽度为 10W 及 10S 中取最大值,高度为 4h 及 4G 中取最大值,底边为共面波导背面接地面下沿。为将电磁场限制在介质层中,本文在边界处刻蚀了贯穿通孔并电镀金,模型如图 3 所示。

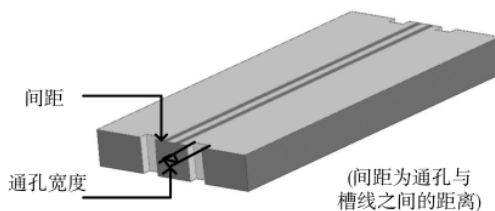


图 3 共面波导边界模型图

其中共面波导上接地面宽度 J 在 1~4 倍介质层厚度的范围内时^[7],其特性阻抗会产生约 2 Ω 的误差量,超出 4 倍介质层厚度后趋于稳定;通孔宽度在接地面共面波导模型范围内存在约 1 Ω 误差;通孔与槽线间距则对匹配的影响最大,当间距小于 7 倍导体带宽度 W 时,特性阻抗随频率降低,不同间距产生约 2 Ω 误差,当间距大于 7 倍导体带宽度 W 时,特性阻抗产生约 4 Ω 误

差,且当频率达到50 GHz时特性阻抗有明显上升。因此,通孔与共面波导槽线间距不可过宽,应与导体带宽度 W 相同,其变化曲线如图4所示。

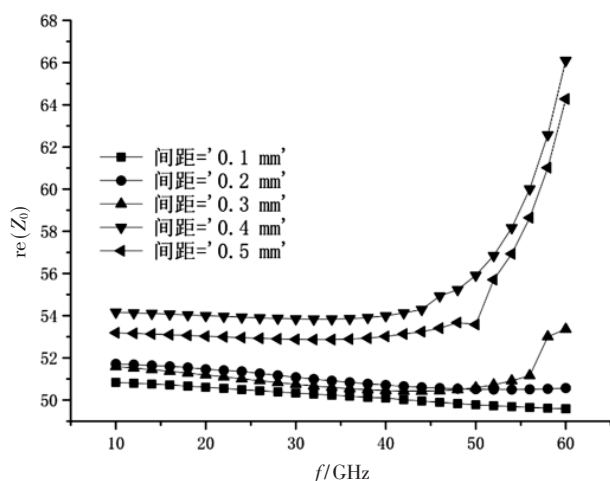


图4 特性阻抗随频率及通孔间距变化曲线图

本文通过以上步骤,完成了滤波器馈线的选型和尺寸确定。

1.3 滤波器小型化设计

完成馈线选型后,进行滤波器小型化设计。本文滤波器 SIW 谐振腔中信号传输模式为 TE 模,其电磁场以共面波导传输方向为轴线,呈水平左右对称分布,轴线部位为 SIW 谐振腔的电磁场等效磁壁^[8],而 SIW 谐振腔在沿等效磁壁切割后,信号传输模式及其位置分布无明显变化,通过此种平面半模切割的方式,可以大大减小滤波器尺寸^[9]。

微带输入输出结构在半模切割下,可以通过补足线宽,将端口恢复为 50 Ω ,而共面波导等转换馈线结构在半模切割下由共面波导转换成槽线结构形式,如图5所示,此槽线结构形式通过槽线两侧金属导体,将通过的电磁场控制在槽线间进行传输,传输的不是传统 TEM 模或准 TEM 模,而是一种波导模^[6]。

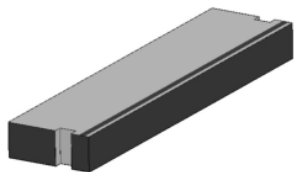


图5 共面波导切割后结构图

共面波导转换成槽线形式后,其特性阻抗通过查看其 S 参数进行对比,其结果如图6所示。

由图6可知,进行等效磁壁半模切割之后,共面波导馈线结构插损和回波损耗有明显的优化。同时在垂直方向上进行堆叠^[10],将信号由单层水平传输转换为从下层介质层传输到上层介质层,并从上层介质层传输回下层介质层的耦合传输模式,进而缩短信号输入输出端口间的直线距离,使得滤波器尺寸进一步变小。双层半模基片集成波导滤波器结构如图7所示。

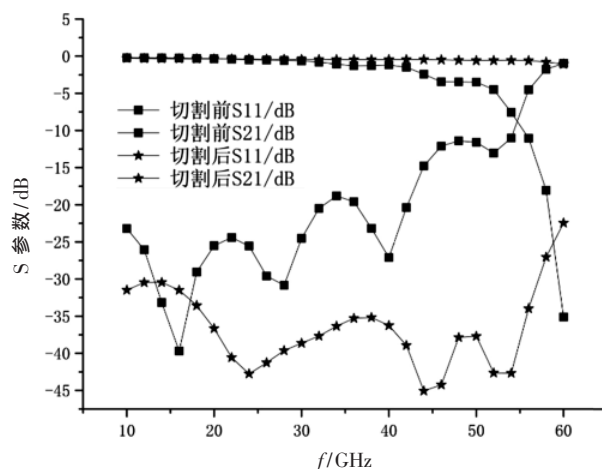


图6 共面波导馈线结构半模切割前后曲线对比图

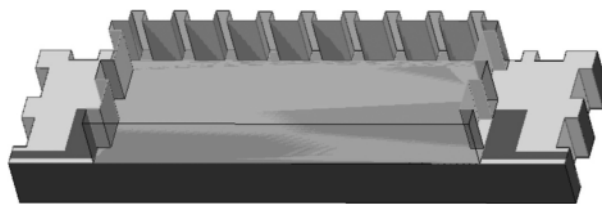


图7 双层半模基片集成波导结构图

1.4 滤波器双通带设计

在小型化的基础上,分析图7所示结构电磁场分布可以得知,下层介质层中均匀分布有所需 TE₁₀₁ 模、TE₁₀₂ 模、TE₁₀₃ 模、TE₁₀₄ 模4种不同模式,其中 TE₁₀₁ 模及 TE₁₀₂ 模电场如图8所示。

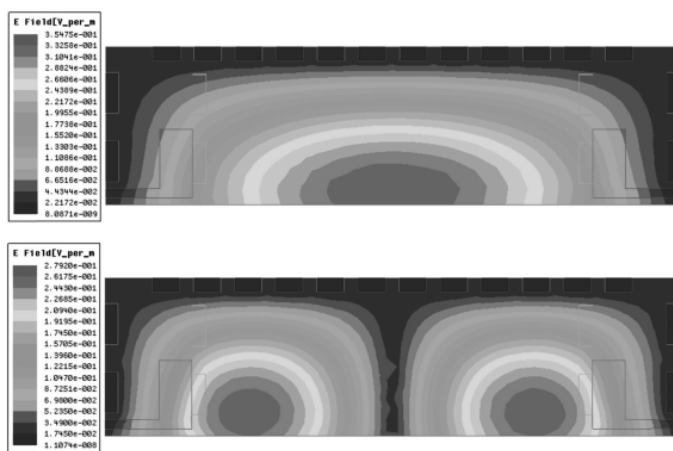


图8 下层介质层 TE₁₀₁ 模(左)TE₁₀₂ 模(右)电场分布图

四种单一模式无法形成所需的双通带性能,且单一通带较窄,此时通过单双模式合并的方式进行通带展宽,由图8可知,在半模谐振腔下边缘中间位置刻蚀通孔^[11],会对 TE₁₀₁ 等单数模式产生高频搬移,而对 TE₁₀₂ 等双数模式并不会产生明显影响,借此将 TE₁₀₁ 模、TE₁₀₂ 模合并为第一通带,TE₁₀₃ 模、TE₁₀₄ 模合并为第二通带,完成本文双通带基础设计,结构如图9所示。

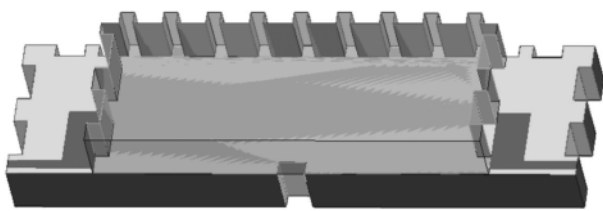


图9 双通带结构图

在完成双通带基础结构的基础上,分析上层介质层电磁场分布,其中 TE101 模及 TE102 模电场如图 10 所示。

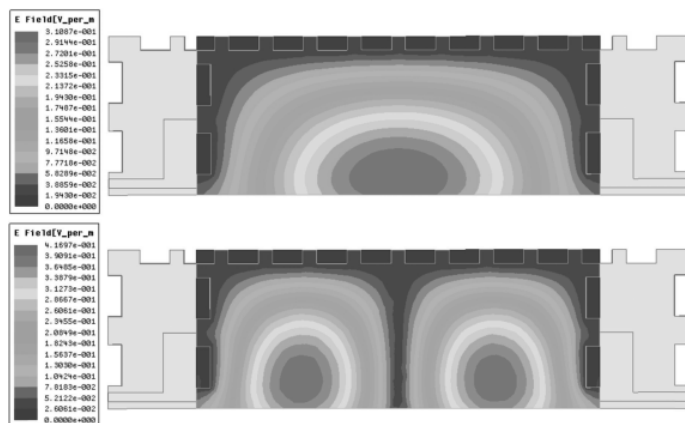


图10 上层介质层 TE101 模(上)TE102 模(下)电场分布图

下层介质层谐振模式并不足以形成良好的宽带特性,本文通过在双层介质层间各模重合处刻蚀 L 型槽线,形成耦合窗口,搭建上下介质层间电耦合通道,将下层介质层 TE101 模 TE102 模形成的第一通带与上层介质层 TE101 模进行合并,形成最终的第一通带,并将下层介质层 TE103 模 TE104 模形成的第二通带与上层介质层 TE102 模进行合并,形成最终的第二通带,其中上层介质层 TE101 模及 TE102 模分别在 29 GHz 以及 47 GHz 处。进一步展宽了双通带带宽,最终结构如图 11 所示。

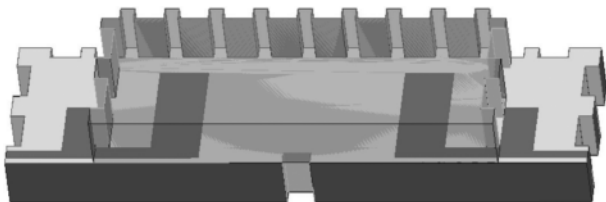


图11 最终结构图

如图 11 所示,本文设计结构所通过的信号经过下层介质层,首先形成所需 TE101 模、TE102 模、TE103 模、TE104 模,然后通过刻蚀下边缘中间通孔合并 TE101 模、TE102 模为第一通带,TE103 模、TE104 模合并为第二通带,完成双通带的构建,接着刻蚀 L 型槽线,将上层介质层 TE101 模并入第一通带、TE102 模并入第二通带,最终完成双通带展宽。

仿真曲线如图 12 所示,滤波器第一通带中心频率为

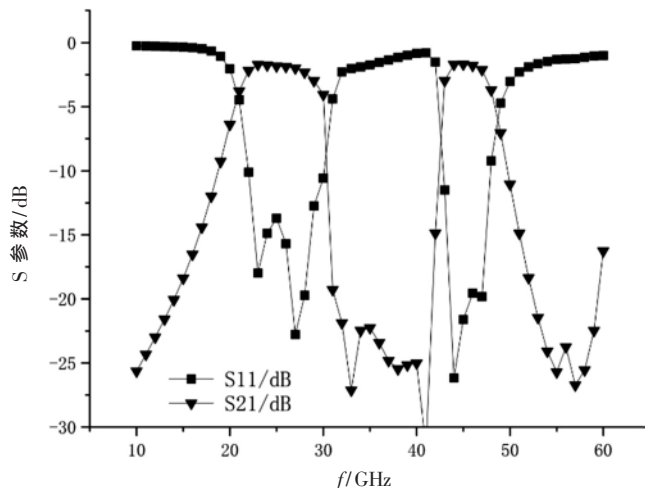


图12 滤波器芯片 HFSS 仿真结果图

25.125 GHz,中心损耗为 1.9 dB,3 dB 带宽大于 7.75 GHz,相对带宽为 30%,双通带间抑制大于 20 dB,第二通带中心频率为 45.25 GHz,中心损耗为 1.7 dB,3 dB 带宽大于 4.5 GHz,相对带宽为 10%,芯片尺寸仅为 4.2 mm×1.1 mm×0.8 mm。

1.5 同类文献对比

本文设计与同类文献对比结果如表 1 所示。

表1 文献对比

	谐振腔数	中心频率/GHz	中心插损/dB	相对带宽/%	尺寸/(λ _g ²)
文献[12]	6	20/21	1.4/1.1	1.5/1.4	2.94
文献[13]	3	30/35	4.8/5.1	6.6/5	1.56
文献[14]	3	5.85/6.15	2.2/2.0	1.7/1.6	5.1
文献[15]	2	10.05/13.7	1.8/1.4	2.88/4.82	1.53
本文	2	26/45.5	1.9/1.7	30/10	0.037

2 结论

本文提出并设计了一款基于 MEMS 的小型化双通带宽带滤波器芯片,分析了输入输出端口共面波导转换结构设计过程,在小型化的基础上,通过通孔及 L 型槽线的形式很好地构建了双通带基础结构并完成各通带的展宽工作。最终设计了一款基于 MEMS 工艺下的高频段、小尺寸、宽频带的双通带滤波器,芯片尺寸仅为 4.2 mm×1.1 mm×0.8 mm。

参考文献

- [1] 常钰敏,戴永胜.高次谐波抑制 LTCC 滤波器的设计与实现[J].功能材料与器件学报,2018,24(3):169-173.
- [2] 袁艳.硅基 MEMS 滤波器的特性研究[D].成都:电子科技大学,2012.
- [3] 沈平,底海英,施朝著,等.毫米波硅片集成 MEMS 滤波器[J].微波学报,2016,32(S1):257-260.
- [4] 任龙,孟令琴,祝君豪,等.直角耦合结构的宽阻带 SIW

(下转第 56 页)

文献[15]设计的迟滞比较器的迟滞电压在 $0\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内温度系数为 $0.11\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ 。本文设计的迟滞比较器的迟滞门限电压在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内的变化最大为 9.16 mV , 温度系数为 $0.0555\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ 。说明本文对迟滞比较器尾电流的温度补偿有效。

4 结论

本文提出了一款宽输入范围的全差分迟滞比较器。通过仿真验证, 电路能够将 $-12\sim 12\text{ V}$ 范围内的差分输入信号准确地转化为数字信号。迟滞门限电压温度系数为 $0.0555\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$, 满足工业级应用。下一步将研究减小器件失配对迟滞门限电压的影响。

参考文献

- [1] 徐深, 牛洪海, 陈俊, 等. CAN 总线数据发送优化方法研究及应用[J]. 自动化仪表, 2020, 41(11): 101-104, 110.
- [2] 杨力宏, 张乐玉, 姚和平, 等. 一款基于 BCD 工艺的低 EMI、高可靠 CAN 总线收发器的设计[J]. 空间电子技术, 2019, 16(1): 70-74.
- [3] THUN M V, DAVID B, DAVID W, et al. SEL and TID test results of a hardened CAN transceiver[C]. Radiation Effects Data Workshop, 2017.
- [4] 张书磊, 莫太山, 叶甜春. 跨阻放大器自动静噪电路的设计与实现[J]. 电子技术应用, 2013, 39(6): 46-48, 52.
- [5] 郭晓峰, 成俊, 江喜平, 等. 一种新颖的低阈值迟滞比较器的设计及应用[J]. 中国集成电路, 2017, 26(6): 16-19, 53.
- [6] CHU W S, CURRENT K W. A CMOS voltage comparator with rail-to-rail input-range[J]. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 1999, 19(2): 145-149.
- [7] 贺莎, 邹望辉. 一种集成轨到轨比较器电路设计[J]. 电子测试, 2020(7): 35-36, 106.
- [8] 李帅三. CMOS 全差分放大器的研究与设计[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2015.
- [9] 张镇, 王雪原, 冯奕. 一种高速高精度 AB 类全差分运算放大器的设计[J]. 电子与封装, 2019, 19(4): 19-23.
- [10] SANSEN M C. 模拟集成电路设计精粹[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [11] 拉扎维. 模拟 CMOS 集成电路设计[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [12] 郑凯伦, 郭桂良. 一种高跨导增益高线性度的共模反馈电路[J]. 微电子学与计算机, 2020, 37(7): 31-35.
- [13] 蔡坤明, 何杞鑫, 陶吉利, 等. 一种增益增强型套筒式运算放大器的设计[J]. 电子技术应用, 2010, 36(5): 66-69.
- [14] 张龙, 冯全源, 王丹. 一种带速率补偿的低功耗带隙基准源设计[J]. 电子元件与材料, 2014, 33(9): 58-61.
- [15] 薛腾飞, 朱江, 乔明. 一种滞回比较器设计[J]. 电子与封装, 2015, 15(3): 26-28, 43.

(收稿日期: 2020-12-27)

作者简介:

冯世勤(1998-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 模拟集成电路设计。

冯全源(1963-), 通信作者, 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 集成电路、RFID 技术等, E-mail: fengquanyuan@163.com。



扫码下载电子文档

(上接第 51 页)

- [1] 滤波器[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2014, 20(4): 466-471.
- [5] 关雪芹, 刘太君, 赵辉, 等. 宽阻带 SIW 滤波器设计[J]. 无线通信技术, 2020, 29(1): 21-25, 31.
- [6] 杨雪雷. 微波技术基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [7] 汪洋, 郭瑜, 余超, 等. 毫米波双通带基片集成波导滤波器设计[J]. 微波学报, 2020, 36(2): 23-27.
- [8] 滕鑫, 陈继新. 加载缺陷地结构的 SIW 宽阻带带通滤波器设计[C]. 中国电子学会. 2019 年全国微波毫米波会议论文集(下册), 2019.
- [9] 黄强, 童元伟. 基于 SCMRC 结构的慢波半模基片集成波导带通滤波器[J]. 电子元件与材料, 2020, 39(9): 72-77.
- [10] 张国鹏, 黄玉兰. 基于 CSRR-QMSIW 谐振器的双通带滤波器的设计[J]. 压电与声光, 2019, 41(4): 469-472.
- [11] 翟琼华. 硅基 MEMS 微波带通滤波器的设计及制备[D]. 太原: 中北大学, 2016.
- [12] CHEN X P, WU K, LI Z L. Dual-band and triple-band substrate integrated waveguide filters with chebyshev and quasi-elliptic responses[J]. IEEE Transactions on Micro-

wave Theory & Techniques, 2007, 55(12): 2569-2578.

- [13] CHEN B J, SHEN T M, WU R B. Dual-band vertically stacked laminated waveguide filter design in LTCC technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2009, 57(6): 1554-1562.
- [14] REZAEI M, ATTARI A R. A novel dual mode dual band SIW filter[C]. Microwave Conference. IEEE, 2014.
- [15] AZAD A R, MOHAN A. Substrate integrated waveguide dual-band and wide-stopband bandpass filters[J]. Microwave & Wireless Components Letters IEEE, 2018, 28(8): 660-662.

(收稿日期: 2021-01-29)

作者简介:

濮泽宇(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 毫米波滤波器。

万晶(1986-), 女, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向: 微波毫米波集成电路。

梁晓新(1979-), 通信作者, 女, 博士, 研究员, 主要研究方向: 微波毫米波集成电路, E-mail: liangxiaoxin@ime.ac.cn。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所