

超声显微测量系统的信号激励接收方法研究*

张宝进¹ 吴炳² 吕金鸽¹ 杨敬² 高杰¹

(1. 北京工业大学 北京 100124; 2. 北京航天测控技术有限公司 北京 100041)

摘要: 超声显微测量技术是一种广泛应用于工业、航空航天、医疗等领域的无损检测方法。为了减小对 100 MHz 以上高频超声激励接收仪的进口依赖,研究高频信号激励接收方法。本文超声激励电路利用三级管雪崩击穿特性,以及 MARX 拓扑电路的电压倍增原理,通过减小激励脉冲脉宽时间,提升带宽覆盖范围。研究了高频超声信号接收电路,并集成超声激励接收仪。研究实现了设备的国产化替代,填补国内超声领域 100~500 MHz 高频脉冲收发仪的空白。实验结果表明,设计产生的高频激励信号峰峰值不小于 128 V、上升沿时间小于 0.47 ns、脉宽小于 3.5 ns,系统工作带宽覆盖 500 MHz,满足高频超声测量系统的需求。

关键词: 无损检测;激励电路;工作带宽;接收电路

中图分类号: TH878; TN782 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 51010

Research on ultrasonic signal excitation and reception method of ultrasonic micromeasurement system

Zhang Baojin¹ Wu Bing² Lyu Jinge¹ Yang Jing² Gao Jie¹

(1. Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Beijing Aerospace Measurement & Control Technology Co., Ltd., Beijing 100041, China)

Abstract: Ultrasonic microscopy measurement technology is a non-destructive testing method widely used in various fields such as industry, aerospace, and medicine. In order to reduce dependence on imported equipment, particularly for high-frequency ultrasonic excitation and reception devices operating above 100 MHz, research into methods for high-frequency signal excitation and reception is crucial. This paper introduces an ultrasonic excitation circuit utilizing the avalanche breakdown characteristics of a transistor and the voltage multiplication principle of the MARX topology circuit to minimize the excitation pulse width, thus enhancing the bandwidth coverage. Additionally, research on high-frequency ultrasonic signal reception circuits and the integration of an ultrasonic excitation reception instrument are presented. The research realized the localization replacement of the equipment, filling the gap of 100~500 MHz high-frequency pulse transceiver in the domestic ultrasonic field. Experimental results demonstrate that the designed high-frequency excitation signal has a peak-to-peak amplitude of not less than 128 V, a rise time of less than 0.47 ns, and a pulse width of less than 3.5 ns, with a system operating bandwidth covering 500 MHz, meeting the requirements of high-frequency ultrasonic measurement systems.

Keywords: non-destructive testing; excitation circuit; operating bandwidth; signal receiving circuit

0 引言

随着制造业加快转型升级,金属材料、电子封装器件、粉末冶金等表面及内部缺陷(分层、微裂纹、空洞等)检测对高精度、高效率的无损检测和评价技术的需求愈发强烈^[1]。在无损检测领域中,超声显微测量技术作为较为常用的检测手段,通过超声波的反射特性,能够以图像的方式展示试

件表面及内部信息^[2-4],超声信号激励接收方法在测量构型件缺陷检查领域^[5-6]与力学测量领域^[7]同样具有很大前景。作为超声显微测量系统核心部件,激励与接收带宽将直接决定可以使用的超声换能器中心频率上限。

超声激励带宽决定了整个超声显微测量系统的带宽上限,激励方法通常分为编码激励和脉冲激励,编码激励信号产生和接收方法相对复杂且成本较高,不适用于 500 MHz

带宽内的超声C扫描。而尖脉冲信号具备简单、经济、应用范围广^[8]的优势,激励能量较大,轴向分辨率高,是超声显微测量系统当前主流的超声激励方式。国外产品如美国JSR公司DPR500系列U5脉冲发生器模块满足100~300 MHz的超声激励。Wang等^[9]通过优化高速驱动电路和MARX结构,产生了幅值37 V,上升沿时间为268.9 ps的单极性脉冲信号;陈伟等^[10]基于串行雪崩三极管,设计了一款脉冲峰值电压可达2.5 kV,上升时间为2.5 ns,带宽500 KHz~125 MHz脉冲发生器。秦宏伟等^[11]使用放大芯片AD603,通过引脚编程使得放大电路在90 MHz带宽下增益变化范围为-11~31 dB,精度为0.5 dB;董金宁等^[12]基于巴特沃斯滤波器设计了有六阶低通有源滤波电路,实现了截止频率10 MHz、通带增益28 dB的滤波器。国内在100 MHz以上高频超声信号接收器领域内暂无稳定可靠的高带宽、低噪声、增益可调信号接收电路,有待进一步研究。

利用三极管雪崩特性结合MARX拓扑电路产生的负脉冲信号所具备的宽带、高压的输出特性,满足100~500 MHz超声测量的脉冲收发需求。采用拓扑电路设计、高带宽硬件设计开发调试和超声检测系统实机扫查试验件评估质量的研究方法,对激励电路、信号调理电路进行研究,开发出国产高频超声激励接收仪,并接入超声测量系统中直接验证超声信号激励接收仪器的性能。实验证明设计的超声激励接收仪可激励中心频率300 MHz的超声换能器,接收带宽可达500 MHz。

1 信号激励接收电路设计

1.1 MARX 电路拓扑结构

使用Multism仿真软件搭建最简电路构型,过程中忽略实际印刷电板(printed circuit board,PCB)制板后上电产生的串扰、寄生电容等问题,对信号激励接收电路进行原理特性仿真分析。为获得更低的负脉冲上升沿时间,在场效应管饱和式电路的基础上利用雪崩击穿的速度远超一般的空间电荷区(positive-negative junction,PN)结正向导通时间的特性,雪崩式负脉冲产生方式电路主要利用三级管的雪崩曲线^[13]。利用雪崩三极管的负脉冲产生电路的上升沿时间 t 与三极管截止频率 f_T 的关系可用式1表示,其中C在图1中为储能电容 C_1 ,供电电压(volt current condenser,VCC)为高压源, f 为重复频率, t 为上升沿时间。

$$t = \frac{1.24}{\pi f_T} \quad (1)$$

以雪崩三极管脉冲产生电路为基础,将多路三极管级联构成MARX电路,如图1所示,三级三极管构成的MARX负脉冲电路图。VCC设置为雪崩三极管临界电压,设置储能电容 $C_1 \sim C_4$ 使其通过电源与电阻将其充电至电源电压,将雪崩三极管的基级与集电极连接,使其仅由集

电极PN结构成的二极管。电路具有带宽高、瞬时功率大的特性,拥有系统功耗小,发热低、能量利用率高、粒子活性高、成本低等优点^[14]。

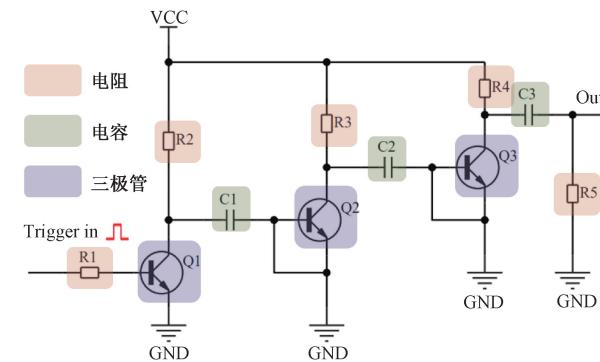


图1 三级Marx负脉冲电路构型

该电路运行原理的关键是:高压直流源给电容 $C_1 \sim C_n$ 充电($VCC > V_{ces}$, V_{ces} 为基极开路时集电极-发射机击穿电压),当正触发信号接入三级管 Q_1 的基极,触发雪崩导通,储能电容 C_1 右端电压瞬间变为- VCC (理想状态),导致 Q_2 集电极与发射级压差为 $2VCC$,远大于雪崩击穿电压 BV_{ces} (基-射极短路时集-射极间击穿电压),并使 Q_2 发生雪崩击穿进入快速导通状态^[9],使得 C_2 右端电压变为- $2VCC$ 。以此类推, C_n 右端电压在理想状态下为- $nVCC$,以每一级的高压负脉冲叠加产生更陡峭的上升沿去触发下一级的雪崩击穿,以此在负载形成纳秒级高压负脉冲。

1.2 信号激励电路设计

1) 激励电路结构设计

根据超声激励接收仪的设计需求,激励模块需要具备调节输出阻抗、输出能量与工作模式的能力^[15]。基于晶体管负脉冲发生电路和MARX电路拓扑结构研究,设计脉冲激励模块如图2所示。

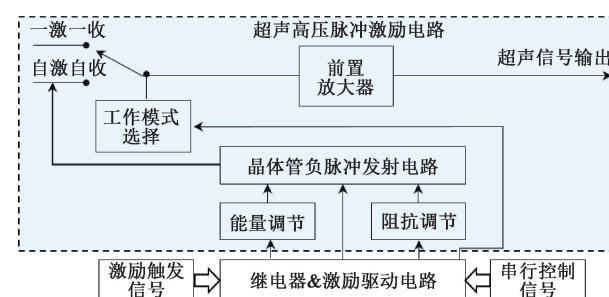


图2 脉冲激励模块原理图

主控电路通过串行控制信号驱动继电器驱动电路控制继电器的通断,进而调节激励模块的输出阻抗、能量和工作模式,在晶体管负脉冲发射电路完成超声换能器激励后,超声回波信号通过反射/透射模式选择回波信号的输入前置放大器对收到的信号进行限幅与初步放大后输出至高频信号接收调理模块中。在信号脉冲激励电路的设计中,主要

难点在于产生高压时容易产生抖动,信号重复的一致性难以保证,且会限制重复频率,无法使用在高频的超声系统中。设计使用级联雪崩三极管组成 Marx 电路拓扑结构使得系统发射电压增加且消除了抖动,使得高电压和重复频率间得到平衡。

2) 高压脉冲产生电路

所研制的激励电路命名为 EU500, 如图 3 所示, EU500 脉冲产生电路的原理图。以 MARX 电路构型为基础, 将多级晶体管电路组合在一起形成脉冲产生电路, 以 NPN 三极管为核心, 通过对触发电路的设计将电路为 9 级工作模

式。以 9 级工作模式为例,触发信号通过电容 R_{37} 电感 L_6 构成的高通滤波器进入第 1 级三极管 Q_1 基级, Q_1 发射级直接接地, 集电极接入 10 K 上拉电阻, 同时接入 2.7 pF 保护电容 C_{20} 接地, 再通过储能电容 C_{47} 、 C_{46} 连接到底一级三极管 Q_2 。 Q_2 基级与发射级相连, 利用集电极 PN 节特性使其成为导通性能可控的二极管, 其发射级接入 10 K 电阻接地, 集电极接入 10 K 电阻, 同样接入 2.7 pF 保护电容 C_{41} 接地, 通过储能电容 C_{39} 、 C_{38} 连接到底一级三极管 Q_3 。同理连接余下 8 级三极管, 共同构成 9 级放大, 实现宽频带和高电压脉冲激励。

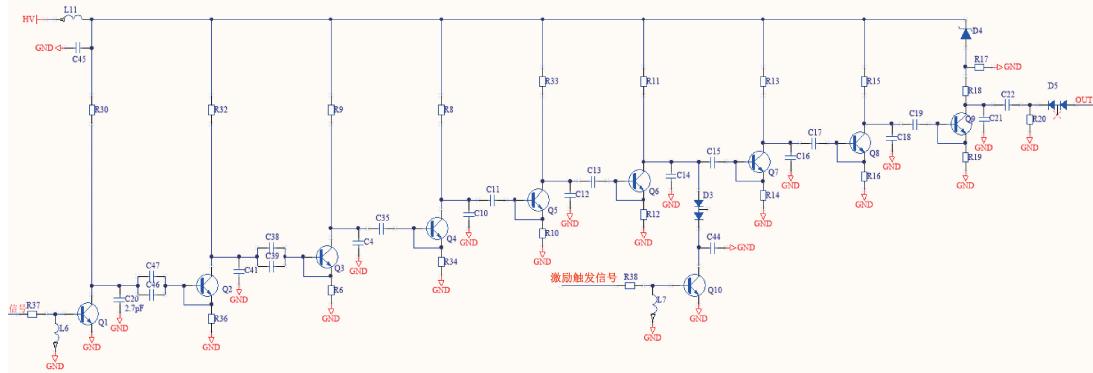


图 3 EU500 脉冲产生电路

EU500 的前置放大电路是在运放与电压钳制电路中增加了一级由两个三极管组成的电压跟随电路。考虑到前置放大器需要达到带宽较高,在运算放大前一级增加了由 NPN 低噪声高增益三极管 BFR949T 组成的初级放大器,最后根据设计电路制作激励板和触发板用作 EU500 的硬件。

1.3 信号接收电路设计

为精准高速控制,采用现场可编程门阵列(field-programmable gate array, FPGA)作为控制元件,选用

JXCLX25-363 芯片搭建的最小功能支持外围电路，并以此为中心拓展超声激励接收仪的功能电路。将所研制的激励电路命名为 RH500，激励电路发送超声信号通过阻容滤波后通过数控衰减器 U_1 衰减后，固定增益放大器 U_2 将信号以固定增益放大，以此实现信号的一级可控放大。信号进入压控衰减器 U_4 ，进行精细衰减调整，其控制电压由数模转换器 U_5 输出，配合固定增益放大器 U_3 实现二级放大并输出，如图 4 所示。

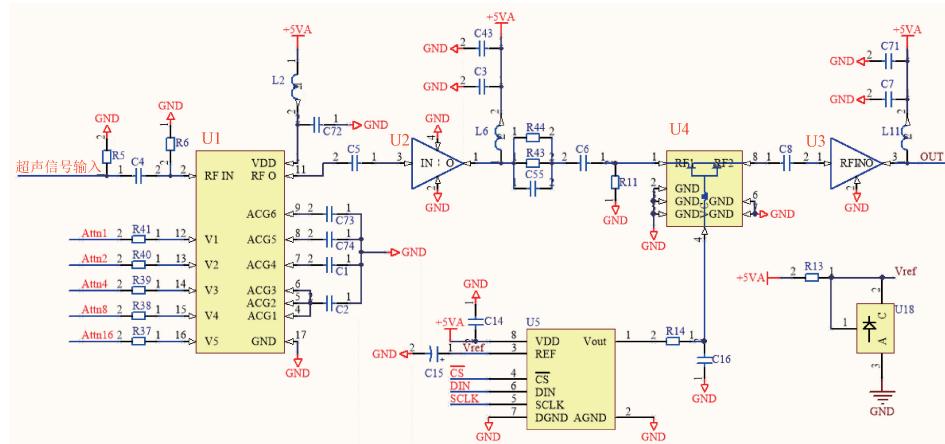


图 4 RH500 可控增益电路原理图

一级放大器的数控衰减器选型采用 BR9154FD, 该款器件工作频率为 1 MHz~8 GHz, 1 dB LSB 衰减步进, 最大衰减量 31 dB, 最大衰减误差为 $0.8 \pm 5\%$ (衰减量)。固定增益

放大器采用BR9123TC,工作带宽为30~3 000 MHz,增益为23~21 dB(30 M~500 MHz),输出功率1 dB压缩点为23.6 dBm。通过先衰减再放大的形式完成对输入的超声波

信号进行一级放大,实现对超声信号的粗略调节。压控衰减器采用MAAV-007941,通过电压输出可以精确控制0~15 dB的衰减量,工作带宽为DC~2 GHz,由于它可以对直流电平进行放大处理,C₆与R₁₁构成的高通滤波器改善放大直流信号过衰减器过热问题。后端固定增益放大器采用BR9116,工作带宽同样位于30~3 000 MHz,增益16.3~15.9 dB,输出功率1 dB压缩点为17.3 dBm。两者共同作用,实现超声信号的精细调节。两级可控放大器组合可以实现-11~35 dB的增益跨度,通过电子开关选择性接入由BR9116和BR9123TC构成的三级放大器,实现了-10~50 dB的增益范围。后端由无源器件组成的滤波电路,针对电路构型对下一级的有源器件输出功率需求,选用输出功率较大的BR9123TC作为最后的有源输出级。电路设计完成后,打板RH500高频超声调理电路PCB。

在超声回波信号接收电路的设计中,主要问题在于在国内超声系统中关于100~500 MHz带宽的接收电路中暂无截止频率可控的滤波电路,缺少线性可调的精准增益电路。需要选择合适的构型和硬件来构建高频信号接收调理电路。其重大工程问题在于设计一个高带宽滤波电路构型解决了带宽问题,设计两级程控放大电路,解决了线性增益的问题。

2 实验验证

2.1 EU500 激励实验

测试所研制激励模块EU500的激励频带特性,并对激励波形进行频谱分析,使用衰减探头接入激励信号输出接口,将高压激励信号衰减30 dB后接入示波器读取波形。选取120 V和140 V的雪崩三极管直流源VCC供电,得到如图5所示的激励模块EU500供电与不同输出阻抗参数下的空载输出波形,实验自变量为供电电压、输出阻抗和频率,因变量为上升沿时间t。

为了能够直观证明EU500模块的性能满足高频超声系统的需求,对标国际主流产品,对JSR公司超声脉冲收发仪中的高频脉冲发生器U5模块性能参数进行测量,对标产品的U5模块空载波形及对应频谱图,如图6所示。相比于对标产品的U5模块,EU500在同样的供电电压下受阻抗变换的影响极小,这意味着在高频处EU500的脉冲能量就更高。通过频谱图的横向对比结果来看,本设计产生的激励脉冲高频端的能量更稳定,意味着激励电路可实现对标产品U5的国产化替代。

2.2 RH500 接收实验

通过测试超声回波信号的实验来验证仪器高频超声接收器性能。如图7所示,展示了硬件结构的连接方式,通过与PC端上位机、示波器与超声换能器连接,构成简易超声测量系统。PC通过USB线将控制指令发送到主机中,主机由主控和电源板与两块高频超声信号调理电路组

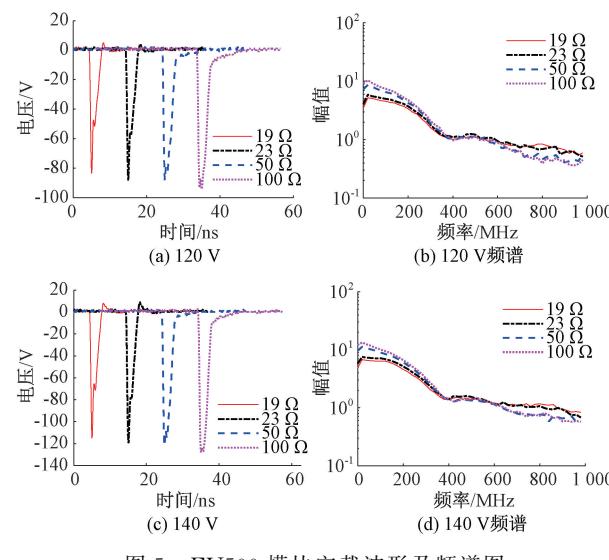


图5 EU500模块空载波形及频谱图

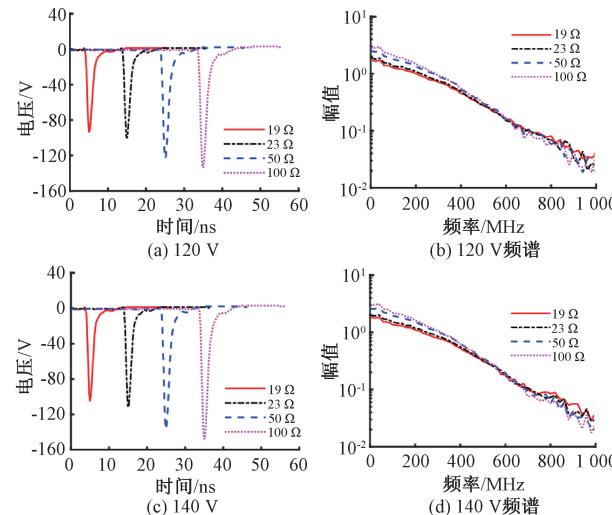


图6 对标产品U5模块空载波形及频谱图

成。通过对试件表面回波的波形与频谱特性进行截取分析,验证该硬件的超声信号接收性能。

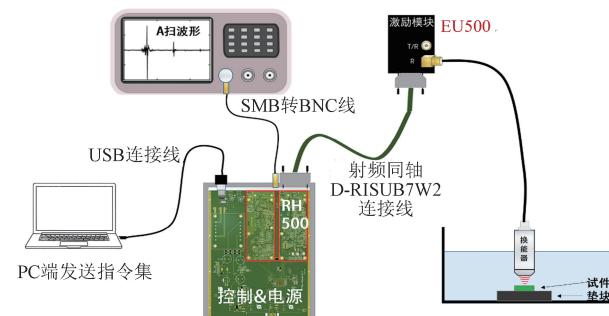


图7 接收性能测试实验平台

使用EU500与RH500模块组合测试,如图8(a)~(d)展示了175 MHz和300 MHz超声换能器的镜面反射波形及其频谱图。从实验结果来看,EU500激励带宽覆盖中心

频率 300 MHz, 且信号在 300 MHz 以上依然具备能量, 频谱最高点分别在 170 MHz 和 310 MHz。

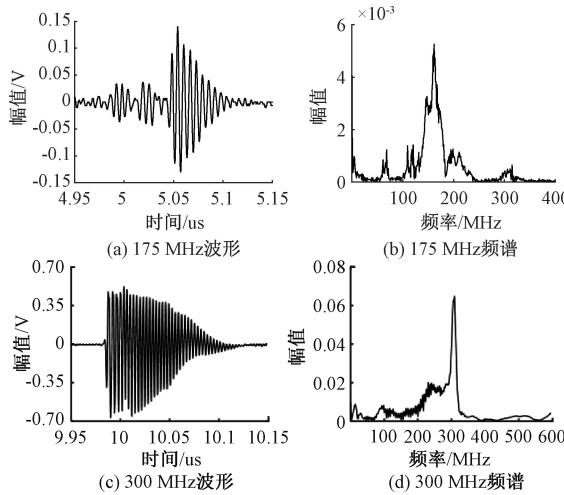


图 8 EU500 与 RH500 组合测试波形及频谱图

由于超声换能器的限制, 导致 300 MHz 的波形震荡, 当超声换能器内部阻抗匹配较差时震荡现象会加剧, 非电路硬件问题。实验结果表明所研制的各电路可以在标定带宽范围内正常工作。

2.3 性能评估

通过两个激励参数对性能参数对比, 得出输出阻抗与带宽成反比, 对频谱能量成正比; 供电电压与带宽成反比, 频谱能量有增大, 脉冲峰值增大。两个参数耦合, 对脉冲上升时间、脉宽以及脉冲峰值产生综合影响。激励模块频带受限于脉冲上升时间, 脉宽决定输出波形的最大能量点, 脉冲峰值决定带宽范围内的整体输出能量。为激励高频超声换能器, 激励信号需要覆盖足够大带宽且目标频率处能量能够满足超声系统使用。因此可以得出本研究方法可产生高压脉冲信号幅值大于 128 V、上升时间约为 0.47 ns 且脉宽小于 3.5 ns 的激励负脉冲信号, 带宽覆盖 500 MHz, 满足高频超声测量系统的需求。将频谱衰减量分别为 0.5、0.2 与 0.1 3 个频率点作为该模块的推荐、典型与有限工作点。如表 1 所示, 展现激励模块在不同参数选择下对应的不同工作点得到。如表 2 所示, 展示了上述 3 个模块拟合后输出波形的脉冲上升时间、脉冲宽度、脉冲峰值与供电电压、阻抗之间的关系。由表可知, 储能电容影响脉宽和峰值, 供电电压与脉冲峰值成正相关。

通过对带宽测试结果和增益线性度的评价, 可反映出 RH500 接收器的性能。为直观验证设计仪器和对标产品的接收性能优劣, 对 RH500 和对标产品进行带宽对比测试, 如图 9 所示, 设置横坐标为固定增益下输入信号的频率, 输入的信号幅值为 10 mV, 纵轴为输出与输入信号峰峰值电压的比值。对增益线性度进行对比测试, 如图 10 所示, 各设置不同输入信号的频率及幅值大小, 纵轴为输出与输入信号的比值。

表 1 EU500 参数推荐表

激励电压/V	阻抗	推荐工作点/典型工作点/有限工作点/		
		MHz	MHz	MHz
112	19	245	380	1 071
	23	238	357	877
	50	196	310	584
	100	182	301	391
140	19	256	532	1 036
	23	255	380	938
	50	213	329	604

表 2 EU500 设置参数与实测性能对应表

供电电压/V	阻抗/Ω	脉冲上升时间/ns	脉宽/ns	脉冲峰值/V
112	34/44	0.47/0.52	2.96/2.97	83.22/88.18
112	104/330	0.55/0.57	3.46/4.05	88.18/94.13
140	34/44	0.50/0.51	2.87/2.92	114.9/118.9
140	104/330	0.62/0.63	3.29/3.50	121.9/127.8

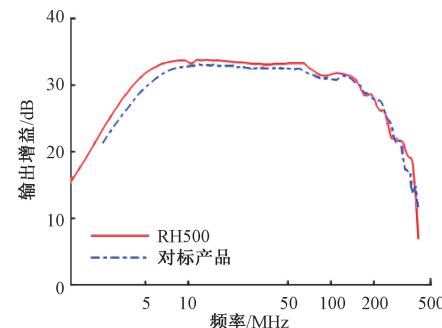


图 9 带宽性能对比

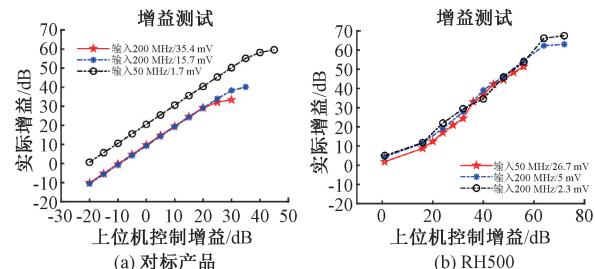


图 10 增益线性度对比

如图 9 所示, 结果可知 RH500 与对标产品在带宽对比中略微占优, 由于增益最高可设置 70 dB, 实际可使用带宽并非按图中最高点衰减的 -3 dB 标准衡量, 以输出信号不失真且可用作显微测量为准, 实际带宽认为可达最大测试点即 500 MHz。如图 10 所示, 本次设计的 RH500 最大增益可达 70 dB, 实际增益效果随控制增益的增大呈上升趋势, 满足使用要求。

2.4 超声 C 扫验证

超声激励接收仪接入超声扫描显微测量系统扫查是

最直观的性能测试方法,对其进行扫查可以发现试件表面与内部连线的缺陷。为验证精度,制作了如图11所示的PCB设计图,其长宽为10 mm,厚度为500 μm ,部分内部图案在100~300 μm 深度处。

使用EU500与RH500配合中心频率300 MHz的水浸聚焦式换能器,水中焦距大小为3.2 mm,设置扫查运动速度为20 mm/s,步进为0.01 mm,重复频率设置为600 Hz,采样频率为2 GHz时的超声C扫表面结果,如图12所示,成功扫查识别出在最初设计中25 μm 线宽的直线,且该缺陷两侧边缘清晰可见,分辨力可达到12.5 μm 。实验结果表明该设备可有效满足高频超声显微测量需求,具有良好的测试效果。

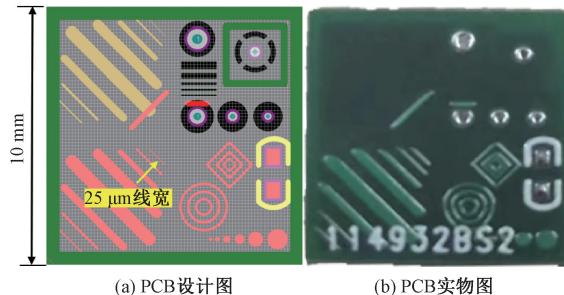


图11 PCB样板设计与实物图

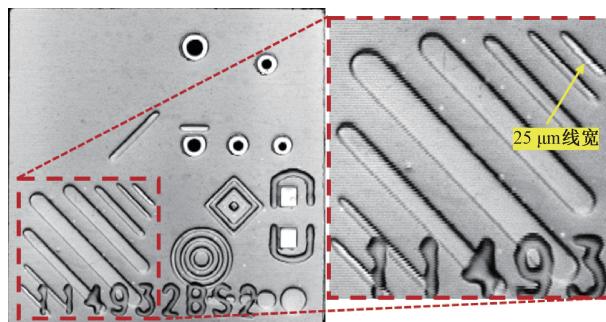


图12 PCB样板扫查结果

3 结 论

研究为国内超声显微测量系统100~500 MHz频段的脉冲激励接收方法提供思路。本次设计分别从电路原理分析、电路设计、程序设计、电路调试、性能测试和实验验证等方面开展工作,电路中元器件整体采用国产化芯片。其关键工程意义在于实现设备的国产化替代,填补国内超声领域高频脉冲收发仪研究的空白,技术上实现自主,器件上实现可控。本设计的创新性在于利用三极管的雪崩击穿并级联成MARX拓扑电路,用来提升激励电压的同时保证系统的带宽。超声脉冲激励电路EU500的实验结果表明所研制的模块脉冲特征峰值可达128 V,上升沿时间最低可达0.47 ns,脉宽小于3.5 ns,典型工作频率最高覆盖500 MHz。设计高频连续可控的高/低通滤波电路构型和两级程控放大电路组成高频超声信号调理电路RH500,验

证激励接收电路的带宽和增益性能,并证明电路组合后具备较高信噪比、线性度与可重复性。补充国内无针对100~500 MHz高频段带宽的超声脉冲激励接收方法的研究。将超声激励接收仪接入超声扫描测量系统,使用水浸聚焦式超声换能器对PCB板标准试件进行扫描成像,实验结果表明,扫查图像清晰,能够准确反映试样表面形貌和结构,使用信号激励/接收仪激励中心300 MHz换能器实现最小25 μm 宽度的缺陷识别。

参考文献

- [1] 窦致夏. 双通道快速超声C扫描系统的研制及成像增强算法研究[D]. 北京:北京工业大学,2019.
- [2] GAO J, WANG X L, LYU Y, et al. Acoustic reflection and transmission at liquid-solid interface of two-phase porous lithium-ion batteries [J]. Acta Acoustica Sinica, 2023, 48(1):138-147.
- [3] 王殿喜,蒋廷勇,张金颢,等. KV/MHz高重频可重构脉冲产生技术研究[J]. 电子测量与仪器学报,2023, 37(5):207-214.
- [4] 许国琛,邓江勇,陈振华,等. 钛合金疲劳裂纹的线性和非线性超声综合定量检测技术[J]. 电子测量与仪器学报,2022, 36(2):196-202.
- [5] 陈伟,王谦,吴高林,等. 基于雪崩三极管的高压方波脉冲发生器研究[J]. 中国仪器仪表, 2020, 355(10): 23-27.
- [6] KWA B, TAO L A, JIE M, et al. Design and optimization of transmitting circuit system of scanning acoustic microscope-ScienceDirect [J]. Sensors and Actuators: A, Physical, 2022, 334:113335.
- [7] 张小军. 超声回波信号采集与传输设计[D]. 成都:电子科技大学,2013.
- [8] 郭杨盛,苏淑靖,吴梦香,等. 皮秒级可调脉宽脉冲码型生成电路设计[J]. 电子测量技术,2022, 45(15):14-20.
- [9] WANG K, LENG T, MAO J, et al. Design and optimization of transmitting circuit system of scanning acoustic microscope [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2022, 334:113335.
- [10] 张家田,秦宏伟,严正国. 双模式宽带程控增益放大器模块设计[J]. 现代电子技术,2022, 45(2):62-66.
- [11] 董金宁,刘宛,池思慧,等. 基于CFA的六阶切比雪夫有源低通滤波器设计与仿真[J]. 电子测量技术,2019, 42(6):119-122.
- [12] 赵佰秋,孟立新,于笑楠,等. 多通道超声的双向单程伪距测量研究[J]. 电子测量与仪器学报,2020, 34(9): 174-180.
- [13] 孙正淳. 基于雪崩三极管Marx脉冲源的抖动抑制与峰值功率合成[D]. 成都:电子科技大学,2021.
- [14] 王安泉,李盈盈,李晨,等. 阵列探头电容成像玻璃钢无损检测系统[J]. 电子测量技术,2021, 44(4):149-154.

作者简介

张宝进,硕士研究生,主要研究方向为无损检测设备研制,超声无损检测技术。
E-mail:zhangbaojin@emails.bjut.edu.cn

吴炳,初级工程师,硕士,主要研究方向为无损检测设备研制,超声无损检测技术。
E-mail:wubing_hf@163.com

吕金鸽,博士研究生,主要研究方向为超声无损检测设备研制,超声无损检测算法。
E-mail:JinGe_Lv@emails.biut.edu.cn

杨敬,高级工程师,博士,主要研究方向为超声无损检测技术研究,无损检测方法等。
E-mail:13811340948@163.com

高杰(通信作者),讲师,硕士生导师,主要研究方向为超声无损检测技术,锂离子电池性能声学表征方法。
E-mail:gaojie@bjut.edu.cn