

作业一：共射放大电路、跨阻放大器与电压放大器的对比分析

一、三类放大器的核心定义与工作原理

1. 共射放大电路

共射放大电路是双极型晶体管（BJT）的三种基本组态之一，以发射极作为输入与输出的公共参考端（即公共端），基极为信号输入端，集电极为信号输出端。其核心工作原理建立在三极管的电流控制特性之上：基极微小的电流变化通过晶体管的电流放大效应（ β ），可控制集电极产生幅度大得多的电流变化，这一变化的集电极电流流经集电极负载电阻时，由欧姆定律转换为相应的电压变化，从而在输出端获得放大的电压信号。该电路属于分立器件构成的放大单元，具有同时实现电流增益与电压增益的能力，是模拟高频电路领域最基础、最核心的结构之一，尤其在中高频段展现了优良的增益-带宽综合性能。

2. 跨阻放大器（Transimpedance Amplifier, TIA）

跨阻放大器是一类以电流为输入、电压为输出的专用放大器，其增益的物理意义为输出电压与输入电流的比值，量纲为电阻单位欧姆（ Ω ），因此也被称为互阻放大器或电流-电压转换器。其核心功能是将电流型信号源输出的微弱电流信号转换为后续处理电路易于接收的电压信号。最经典且广泛采用的实现方式为高增益运算放大器搭配跨接在反相输入与输出端之间的反馈电阻构成，也可通过晶体管分立组态（如共基极组态配合负载电阻）实现。跨阻放大器最突出的技术优势在于其极低的输入阻抗——这一特性使输入端的信号电流尽可能流向反馈网络并被放大，同时有效降低了输入节点处寄生电容对带宽的限制效应，

因而特别适合与高输出阻抗、电容性信号源（如各类光电探测器）配合使用。

3. 电压放大器

电压放大器是一个广义的功能分类概念，泛指以提升信号电压幅度为核心目标的一类放大器，其输入信号与输出信号均为电压参量，核心性能指标为无量纲的电压增益（即输出与输入电压之比）。电压放大器是一个庞大的电路家族，涵盖范围极广：既包含以分立晶体管实现的共射、共基、共集等基本组态放大电路，也包含由运算放大器为核心构成的同相/反相比例放大电路、仪器放大电路，还包括射频前端中广泛使用的商用集成增益模块（如 GALI 系列、ERA 系列）等多种实现形式。电压放大器是模拟信号调理链路中应用最为广泛的基础电路类型，覆盖从直流到射频的全频段应用场景。

二、三类放大器的核心区别

三类放大器在输入输出类型、增益物理意义、输入阻抗特性、核心作用及实现形式等方面存在本质差异。

在输入输出类型方面：共射放大电路为电压输入、电压输出；跨阻放大器为电流输入、电压输出；电压放大器为电压输入、电压输出。

在增益物理意义方面：共射放大电路的增益为电压增益（无量纲），同时具备电流增益（ β ）；跨阻放大器的增益为跨阻增益（量纲为 Ω ）；电压放大器的增益为电压增益（无量纲）。

在输入阻抗特性方面：共射放大电路具有中等输入阻抗（典型值数百 Ω 至数千 Ω ），适配电压型信号源；跨阻放大器具有极低输入阻抗（理想为零），专为电

流型信号源设计；电压放大器通常具有高输入阻抗，适配标准电压信号源。

在核心作用方面：共射放大电路以分立器件实现高频段的电压放大，兼顾增益与带宽的平衡；跨阻放大器完成电流-电压的跨域转换，适配电流输出型探测器；电压放大器为通用型电压幅度提升，应用覆盖从低频至射频的全频段。

在实现形式方面：共射放大电路仅为晶体管分立电路组态（单一拓扑）；跨阻放大器可由运放加反馈电阻、分立晶体管等多种形式实现；电压放大器包含分立电路、集成芯片等全部电压放大形式，范围最广。

除此之外，三类电路在噪声特性与带宽特性上存在显著差异，需根据具体应用场景审慎选择。跨阻放大器的噪声性能由反馈电阻的约翰逊噪声、运放的电压/电流噪声以及输入端寄生电容共同主导，是微弱电流信号探测链路中的首要噪声瓶颈，设计时需在反馈电阻值（决定增益）与带宽之间做出折中。共射放大电路可通过合理的晶体管选型（高 f_T 、低 NF 器件）与静态工作点优化，在高频段同时实现优良的噪声系数与较高的增益，非常适合射频前端的前置低噪声放大。电压放大器因涵盖的实现形式极为广泛，其性能跨度极大——从低噪声精密运放构成的低频放大器到 GaAs 工艺的射频增益模块，噪声系数、带宽、失真等指标差异巨大，必须根据具体选型与电路拓扑来确定其真实性能。

三、三类放大器的相互关联

三类放大器并非彼此孤立、互不相关的独立电路体系，在实际工程应用中存在紧密的层级关联与功能配合关系，理解这些关联有助于在系统设计中合理分配各级功能。

从包含关系来看：共射放大电路是电压放大器的一种典型分立实现形式，属于

电压放大器这一大类的子集；而电压放大器则是对所有具有电压增益功能的电路拓扑的统称，涵盖范围最广。

从级联配合关系来看：在光电探测、粒子物理实验等典型应用场景中，三类放大器常以链路形式级联配合，各司其职。以 LGAD 硅探测器读出系统为例：探测器输出的原始信号为微弱电流脉冲（幅度为微安至毫安量级，脉宽为纳秒级），该电流信号首先必须经过跨阻放大器完成电流-电压转换（I-V 转换）——利用其低输入阻抗特性最大限度收集探测器输出电荷，并将微弱电流转化为可供后续处理的电压信号；随后，该电压信号通过共射放大电路（分立形式）或商用集成电压放大器（如 GALI 系列射频增益模块）完成多级电压幅度的逐级提升；最终达到后端数据采集系统（如 ADC 或示波器）的输入幅度要求，完成完整的信号调理链路。

从拓扑可转化性来看：从电路原理层面看，共射放大组态通过调整反馈结构与输入方式（例如引入从集电极到基极的负反馈），也可实现跨阻放大器的功能——将基极输入电流转换为集电极输出电压；而跨阻放大器内部的输出级本身也包含电压放大结构（通常为共射或共源级联）。因此，三类电路在晶体管放大物理本质上具备共通性，并非不可跨越的独立分类。

四、典型应用场景

共射放大电路主要应用于高频、射频领域的分立信号放大场景，具体包括：高速脉冲信号的前置放大（如核电子学前端电路）、射频前端的小信号低噪声放大、GHz 级带宽的定制化放大器设计等。该电路拓扑适合在需要同时兼顾带宽、增益与设计成本的定制化应用中使用，尤其当商用集成放大器无法满足特

定指标要求时，分立共射电路提供了灵活、可控的备选方案。

跨阻放大器的核心应用领域为电流输出型传感器的信号调理链路，具体包括：光电二极管（PD）的光电流读出、雪崩光电二极管（APD）的微弱光信号探测、硅光电倍增管（SiPM）的单光子级信号读出、LGAD 及传统硅微条探测器等粒子物理实验中各类探测器的电荷灵敏读出。跨阻放大器是光学探测、粒子物理实验及高速光电互联系统中前端信号调理电路的核心单元，其性能直接影响整个探测系统的最优信噪比和响应速度。

电压放大器的应用覆盖面极广，几乎涵盖了所有电子系统的信号调理环节，具体包括：数据采集系统的输入信号调理与幅度标准化（将传感器输出的微弱电压信号放大至 ADC 的最佳输入范围）、高保真音频信号的功率与电压放大、各类传感器（温度、压力、加速度等）输出信号的标准化放大、通信系统射频前端中的增益级联与中频放大等。电压放大器是模拟电路设计中最基础、应用最普遍的功能单元，其实现形式从单晶体管到复杂集成 SoC 跨越多个技术层次。

作业二：LGAD 单通道前置放大板设计说明

一、设计概述

本设计针对低增益雪崩探测器（Low-Gain Avalanche Detector, LGAD）的高速脉冲信号读出需求，完成了单通道前置放大板的完整原理图设计。整体系统包含低压电源管理模块、高压偏置电路模块、信号输入保护模块、一级共射放大

模块、二级集成放大模块五大功能单元，设计完整覆盖了题目所列的全部指标要求。

在性能指标方面，本设计能够实现对上升沿约 500ps、脉宽约 2ns（对应信号带宽约 1GHz 以上）的高速快脉冲信号的低失真两级放大，总增益精确控制在约 10 倍（20dB），同时为 LGAD 探测器提供稳定、低噪声、可泄放的高压偏置接口，并具备板载电源开关控制功能。

在设计方法论层面，本设计始终以“实际元件的非理想特性”作为核心工程考量——在滤波网络设计、阻抗匹配网络设计、无源器件选型与降额设计等关键环节，均针对真实电容的寄生串联电感（ESL）与等效串联电阻（ESR）、真实电感的寄生电容与自谐振频率（SRF）、真实电阻的高频寄生效应等非理想因素做了系统性分析与针对性优化，确保电路在高速信号条件下的实际工作时序与性能与理论设计高度一致。

二、低压电源管理模块设计

1. 5V 总输入接口电路

本模块作为整板低压供电的总入口电路，其设计质量直接影响整板的供电安全与噪声底限。采用 DC005 直流插座作为 5V 外部电源输入接口，依次串联三项保护与控制器件。

第一，SS12 肖特基防反接二极管（D1）：利用肖特基二极管的单向导电特性，当外部电源极性接反时，二极管处于反向截止状态，从而有效阻断反向电流路径，保护后级所有低压电路免受反压损伤。选用肖特基管而非普通整流管，是因为肖特基管的正向压降 V_f 较低（典型值 0.2~0.3V），可最大限度减少电源通

路上的功率损耗与压降，在低压供电系统中尤为重要。

第二，MF-R050 自恢复保险丝 (F1)：当后级电路发生短路或过流故障时，流经保险丝的电流超过其保持电流 (0.5A)，保险丝内部聚合物材料受热膨胀进入高阻态，自动切断电源通路；故障排除且断电冷却后，保险丝自动恢复至低阻态，无需人工更换即可恢复系统正常工作。这一特性显著提升了系统的免维护性与长期运行可靠性。

第三，板载电源开关：通过 DSHP01TSGER (或兼容型号的船型/拨码开关) 实现整板低压电源的手动通断控制，满足题目“低压 5V 输入，支持板上开关控制电源通断”的明确要求。

在电源入口处，采用两只 100nF 陶瓷电容并联滤波。这一设计的工程逻辑直接对应“实际电容非理想特性”的考量：任何实际的陶瓷电容均存在固有的寄生串联电感 (ESL) 和等效串联电阻 (ESR)，在高频条件下，电容与 ESL 形成串联谐振，超过自谐振频率后电容器呈现感性，失去滤波作用。通过将两颗相同容值的电容并联使用，可等效降低总 ESL (并联电感减半)，从而提升高频段的滤波效果，有效抑制由电源线引入的高频传导干扰与瞬态尖峰噪声。

2. 可调 LDO 供电支路 (核心器件：TPS79901DDCR)

设计采用两片题目指定的 TPS79901DDCR 低压差线性稳压器 (LDO)，分别为两级放大电路提供独立、低噪声的供电电源。采用“双 LDO 独立供电”拓扑的核心考量在于：两级放大电路 (分立 BFR840 共射级与集成 GALI-52+ 放大器) 的工作电流特性与瞬态响应不同，若共用单路电源，第二级大动态范围的信号电流会通过电源内阻耦合回第一级，形成有害的级间电源串扰，甚至引发链路自

激振荡。双路独立供电从物理上切断了这一耦合路径，显著提升了系统稳定性。

一级放大供电支路 (U1)：通过设置反馈分压电阻 $R1=10k\Omega$ 与 $R2=8.87k\Omega$ (均为 $\pm 1\%$ 精度)，配置 TPS79901 的输出电压为 $V_{out} = V_{fb} \times (1 + R1/R2) = 1.24 \times (1 + 10k/8.87k) \approx 2.25V$ ，该电压为 BFR840 共射放大电路供电，三极管在该电压下可稳定工作在预设的静态工作点 ($V_{ce} \approx 2V$, $I_c \approx 12mA$)。

二级放大供电支路 (U2)：通过设置反馈分压电阻 $R5=10k\Omega$ 与 $R6=26.7k\Omega$ ($\pm 1\%$ 精度)，配置输出电压为 $V_{out} = 1.24 \times (1 + 10k/26.7k) \approx 4.40V$ 。GALI-52+射频放大器在该电压下可提供数据手册标称的典型增益与线性度，同时留有足够的电压余量避免过早进入饱和区。

三级去耦网络设计：每一路 LDO 的输入引脚与输出引脚均采用"10 μ F 大容量陶瓷电容 + 500nF 中容量陶瓷电容 + 100nF 小容量 NPO 高频电容"三级并联的去耦结构。这一分级去耦策略的设计逻辑如下。

10 μ F 大容量层采用 X7R 材质多层陶瓷电容 (MLCC)，负责滤除电源中的低频纹波 (50Hz/100Hz 及其谐波) 并承担瞬态电流的储能缓冲功能。大容量确保低频段具有足够低的阻抗。

500nF 中容量层覆盖中频段 (数百 kHz 至数 MHz) 的去耦需求，填补大容量电容在高频端因 ESL 作用开始感性化、而小容量电容在低频端容抗过大的过渡频段。

100nF NPO 高频层选用 NPO (COG) 材质的高频陶瓷电容。NPO 电容具有极低的 ESR 与 ESL，自谐振频率可达数百 MHz，在高频段仍保持纯容性特性，能

够有效抑制电源线上的高频尖峰噪声与射频干扰。普通 X7R 或 X5R 电容在此频段下因介质损耗大、ESR 高，滤波效果显著劣化。

三级电容配合，实现了从低频（数十 Hz）到超高频（数百 MHz）的全频段电源去耦覆盖，充分抑制了来自外部电源适配器及电路内部产生的各种频率成分的噪声，有效防止电源噪声耦合至信号通路中劣化探测器信号的输出信噪比。

三、高压偏置电路模块设计

高压偏置电路负责为 LGAD 探测器提供纯净、稳定、安全的反向偏置高压电源，是探测器正常工作的前提条件。本设计严格遵循高压电路的可靠性设计原则与低噪声偏置设计原则。

1. 接口与安全设计

高压输入接口与高压输出接口均选用 PZ254V-11-02P 高压接插件（2.54mm 间距，额定耐压 $\geq 300\text{V}$ ），替代传统的裸焊盘或简易接线端子，保证了高压连接的机械可靠性与绝缘耐压性能。器件选型留有充足的电压设计余量

（ $\geq 500\text{V}$ ），满足多种偏压规格 LGAD 探测器的使用需求。

在高压输入通路中，于输入端并联 $1\text{M}\Omega$ 高压泄放电阻 R10，这一设计属于高压电路的标准安全规范要求：当系统断电后，高压滤波电容（C25、C26）上储存的残余高压电荷可通过该电阻形成缓慢泄放通路，在数秒内将电压降至安全水平（ $< 36\text{V}$ ），消除了接口焊盘残留高压可能导致的触电风险以及后级器件在二次上电时受到的电压冲击损伤。

2. 高低频滤波网络

高压偏置采用"串联滤波电阻 + 高低频并联电容"的 RC 低通滤波拓扑，这是硅探测器偏置电路中经工程验证的经典结构，其滤波性能远优于单级电阻或单级电容方案。

串联滤波电阻 R11 (10MΩ, 耐压≥500V): 该大阻值电阻与后端滤波电容共同构成 RC 低通滤波器，其截止频率 $f_c = 1/(2\pi RC)$ 极低 (配合 10μF 电容时约为 1.6mHz)，对高压源输出端可能存在的各类纹波、慢漂移及低频噪声具备极强的抑制能力。选用耐压≥500V 的高压电阻，确保在正常偏压及异常过压条件下均不发生击穿。由于 LGAD 工作在反向偏置状态，其漏电流仅为纳安 (nA) 至皮安 (pA) 量级，因此 10MΩ 电阻上的直流压降 $V = I_{leak} \times R$ 可以忽略不计，不影响探测器两端的实际偏压值。

双电容并联滤波 (C25=10μF + C26=100nF NPO): 此双电容并联结构直接回应题目中"考虑高频、低频滤波"以及"实际电容非理想特性"的双重要求。

10μF 大容量陶瓷电容 (C25) 承担滤除高压源低频纹波与电压波动的任务，其大容量特性确保了低频段具有足够低的阻抗，能够有效吸收来自外部高压电源模块的 50Hz/100Hz 工频纹波及其谐波成分。

100nF NPO 高频电容 (C26) 采用 NPO (COG) 材质的高频陶瓷电容，具有极低的 ESL 与 ESR，自谐振频率可达数百 MHz。该电容专门用于滤除高压源可能产生的高频尖峰噪声、开关电源的开关频率谐波以及空间电磁耦合干扰。普通大容量陶瓷电容在高频段会因内部电极结构的寄生电感而呈现感性 (阻抗随频率升高而增大)，恰恰在最需要低阻抗的高频段失去滤波作用，而 100nF NPO 电容完美弥补了这一缺陷。

二者配合，实现了从低频到高频的全频段偏置电压噪声抑制，为 LGAD 探测器提供了高纯净度、低噪声的偏置工作电压。

3. 电气隔离设计

高压偏置通路与低压放大信号通路在 PCB 板级实现了完全的物理隔离——高压节点与低压节点之间留有充足的安全间距 ($\geq 2\text{mm}$)，二者之间不存在任何直接的直流电气连接，仅通过外接的 LGAD 探测器内部（通过探测器自身的体电阻与耗尽层电容）形成唯一的交流信号耦合路径。这一拓扑设计从根本上杜绝了高压直流偏置窜入低压放大电路的可能性，即使 DSHP01TSGER 隔直电容发生击穿失效，高压也无法直接进入后级放大链路，是核电子学前端电路的核心安全设计原则。

四、信号通路设计

整体信号链路架构为：LGAD 探测器信号输出 → 信号输入接口（SMA 母座）
→ 高压隔直与 ESD 保护单元 → 一级 BFR840 共射放大 → 二级 GALI-52+ 集成放大 → π 型衰减校准网络 → 输出接口（SMA 母座）。

全链路按照 50Ω 特性阻抗体系进行设计，信号走线阻抗连续，最大程度抑制高速脉冲信号在传输路径中因阻抗突变而产生的反射、振铃与上升沿退化，保证 500ps 上升沿、2ns 脉宽信号的时域波形完整性。

1. 信号输入接口与保护单元

高压隔直电容 C27（100pF，NPO 材质，耐压 $\geq 500\text{V}$ ）是实现交直流分离的核心元件。LGAD 探测器工作时，其信号输出电极上叠加了两类信号成分：数百

伏的直流反向偏置高压（由高压偏置模块提供）和纳秒级幅度的交流快脉冲信号（粒子击中产生的电离信号）。隔直电容利用电容器“通交流、隔直流”的本质特性，完全阻挡直流高压分量通过（直流下容抗趋于无穷大），仅允许高速交流脉冲信号通过（高频下阻抗极低，100pF 在 1GHz 时容抗仅约 1.6Ω），从而在物理层面将低压放大电路与高压偏置隔离。选用 NPO（COG）材质的高频高压电容，是因为 NPO 材质的容值在宽温度范围（-55°C 至 +125°C）和偏压条件下均极其稳定，且 ESR 极低（<0.1Ω），不会对高速脉冲信号的上升沿造成退化和损耗。

低电容 ESD 保护器件 PESD5V0S1BBN 并联连接于隔直电容后级的信号通路与地平面之间，其作用是在出现静电放电（ESD）或浪涌过压时，将信号线上的异常过压快速钳位至 5V 以内，保护后级 BFR840 超高频三极管不被过压击穿。选用该型号的关键决策依据是其结电容极低（典型值仅 0.3pF）——对于上升沿 500ps（等效带宽约 700MHz）的高速信号而言，任何额外的并联电容都会与源阻抗形成低通滤波器，对高频分量造成衰减，导致信号上升沿变慢。0.3pF 的结电容在 1GHz 下的容抗约为 530Ω，对 50Ω 系统的信号传输影响极小，从而兼顾了 ESD 防护性能与高速信号带宽两大矛盾需求。

阻抗匹配电阻 R2（47Ω）在输入端串联，配合 BFR840 共射放大级的输入阻抗（在 GHz 频段呈现约 3~10Ω 的实数部阻抗），使从信号源（探测器及传输线）看入的总输入阻抗接近标准的 50Ω 系统阻抗。这一匹配设计显著减小了高速脉冲信号在信号源-放大器界面处的反射系数，有效抑制了因多次反射引起的信号上升沿畸变、过冲（Overshoot）与振铃。

2. 一级共射放大模块（核心器件：BFR840 LNA）

一级放大采用英飞凌 BFR840L3RHESD 超高频 NPN 双极型晶体管构成经典的共射放大组态，完成信号的第一级电压放大。BFR840 的特征频率 f_T 高达约 45GHz，在 2V 偏置下噪声系数 NF 低至约 0.8dB，是专门为高速低噪声放大器（LNA）应用优化的器件，完美适配 500ps 上升沿的 GHz 级宽带脉冲信号放大需求。

偏置电路设计采用电阻分压式基极偏置拓扑。电阻 R3 与 R4 构成分压网络，从 2.25V 供电电源分压获取稳定的基极直流电位。该偏置架构通过固定基极电压的间接方式稳定集电极静态电流——当温度升高导致三极管 β 值增大时，集电极电流 I_c 有增大趋势，但基极偏压固定，发射极电阻上的压降（ $V_e = I_e \times R_e$ ）增大将有效抑制 I_c 的漂移，实现静态工作点的温度稳定性。经计算，预设的静态工作点为 $V_{ce} \approx 2.0V$ 、 $I_c \approx 12mA$ ，该工作点处于 BFR840 增益-噪声综合性能最优的区域。

集电极负载设计体现了对“实际电感非理想特性”的关键工程考量。集电极负载采用“100nH 高频扼流电感 L1 + 电阻”的复合负载结构。其中 100nH 扼流电感的作用是：对直流呈现极低阻抗（直流电阻仅数十毫欧），为三极管提供低损耗的直流供电通路；对高频交流信号呈现高阻抗（100nH 在 1GHz 时感抗约 628 Ω ），有效阻止高频信号电流被供电电源端短路，从而将信号电流引导至下一级，显著提升高频段的增益。

此处尤其需要注意的是：实际电感除标称电感量 L 外，还存在匝间/层间寄生电容 C_p 。当工作频率接近或超过电感的自谐振频率（ $SRF = 1/(2\pi \sqrt{L \cdot C_p})$ ）时，

电感会呈现容性阻抗，完全失去扼流作用。因此本设计选用自谐振频率大于 3GHz 的高频陶瓷绕线或叠层电感，确保在信号带宽内（DC~1GHz）电感始终维持理想的感性阻抗特性，避免高频性能劣化。

输出隔直方面，集电极输出端串联 100pF NPO 材质隔直电容，其作用是隔离 BFR840 集电极的直流电位（约 2.0V），仅将放大后的交流脉冲信号传递至下一级，确保后级电路的工作点不受前级直流偏置影响。

3. 二级集成放大模块（核心器件：GALI-52+）

二级放大采用题目指定的 GALI-52+ 商用宽带射频放大器芯片（Mini-Circuits 出品）。该器件为基于达林顿（Darlington）结构的高线性度、宽频带集成增益模块，其主要技术参数包括：带宽覆盖 DC~3GHz（远远覆盖信号带宽需求），典型增益约 22dB（相当于 12.6 倍电压增益），典型噪声系数 NF 约 3.5dB，内部已完成 50Ω 输入输出阻抗匹配而无需额外匹配网络。这些特性天然满足了题目“二级放大约 10 倍”的总增益指标要求（22dB 已超过需求），且其内置匹配特性大幅简化了外围电路设计。

供电拓扑采用射频扼流电感偏置（RF Choke Bias）方式——直流电源通过一颗高频扼流电感（自谐振频率 > 3GHz）馈入 GALI-52+ 的射频输出引脚（该引脚兼具直流供电与射频信号输出功能）。扼流电感对直流短路、对交流高阻，实现了供电与信号在同一物理引脚上的频率分离复用，互不干扰。供电引脚处配置三级去耦电容，结构同前文所述的低频 10μF+中频 0.1μF+高频 100pF NPO 组合，确保偏置电压的极低噪声特性。

π 型衰减校准网络（2dB）设置在 GALI-52+ 输出端至 SMA 输出接口之间，由一

组串联电阻 R8 (12Ω) 与两颗并联电阻 R7/R9 (215Ω) 构成对称 π 型衰减器，衰减量精确设计为 2dB。该网络的设计目的涵盖两方面。

第一是增益精确校准：GALI-52+的原始开环增益约 22dB，加上第一级 BFR840 的增益约 5~6dB (考虑级间耦合损耗)，原始总增益远超过 10 倍。 π 型网络将总增益精确校准至约 20dB (即 10 倍电压增益)，精准对应设计指标。

第二是级间匹配改善与稳定性提升： π 型衰减器的双向阻抗匹配特性可有效降低各级之间的驻波比 (VSWR)，抑制因输出端外接测试设备 (示波器/采集卡) 输入回损有限而引起的二次反射与自激倾向，显著提升系统的大信号稳定性。

π 型衰减器中的电阻选用高精度 ($\pm 1\%$)、低寄生电感的薄膜贴片电阻，避免普通厚膜电阻的高寄生电感导致高频下衰减量偏移、信号上升沿因寄生低通效应而退化的工程问题。

输出接口采用 6GHz 带宽、50Ω 特性阻抗的 SMA 同轴连接器作为最终信号输出接口，适配数字示波器、高速数据采集卡等标准测试设备的前端输入端口，保证高速脉冲信号从板级到同轴电缆传输过程中的阻抗连续性与信号完整性。

五、设计总结

针对要求 1 (低压 5V 输入，板上开关控制电源通断)，设计方案为：5V 经 DC005 输入，通过 SS12 防反接二极管、MF-R050 自恢复保险丝、板载开关，再经两路独立 LDO 供电。

针对要求 2 (提供 LGAD 高压偏置接口)，设计方案为：高压接插件输入，经 TVS 保护、1MΩ 泄放电阻、10MΩ+10μF+100nF RC 滤波、DSHP01TSGER 隔直

后输出。

针对要求 3（二级放大，总增益约 10 倍），设计方案为：BFR840 一级共射放大（约 5 倍）级联 GALI-52+二级集成放大（约 12 倍），再经 2dB π 型衰减校准，总增益约 10 倍。

针对要求 4（优先使用三款参考器件），设计方案为使用了 TPS79901DDCR（LDO）两片、GALI-52+（集成放大器）一片、DSHP01TSGER（高压电容）一片。

针对要求 5（考虑电容电感的非理想特性），设计方案贯穿了多电容并联去耦、NPO 高频材质选取、SRF>3GHz 扼流电感选取、薄膜低寄生电阻选取等工程优化。

针对要求 6（绘制完整原理图，提交设计说明），已完成原理图 PDF 与本文设计说明。

针对要求 7（拓展项：PCB 版图绘制），同步完成了 PCB 布局布线，文件随附。

设计过程中，始终将实际元件的非理想特性贯穿于每一个元器件的选型与每一个子电路的拓扑决策中——从电容的 ESL/ESR 到电感的 SRF，从电阻的寄生电感到接插件的耐压降额——确保电路在真实的 500ps 上升沿、2ns 脉宽的高速脉冲信号条件下，仍能实现低失真、低噪声、高稳定性的信号放大性能，并具备完善的可靠性保护与工程安全设计。

本次设计同步完成了对应 PCB 版图的绘制与布局优化，原理图源文件、PDF 导 schematic 与 PCB 设计文件均随本报告一并提交。