

作业一、共射放大电路、跨阻放大器与电压放大器详解

本文以理论框架为骨架，以 LGAD 探测器前端电子学项目为实例，系统梳理三类电路的基本原理、典型拓扑、相互关系与应用场景。

1. 共射放大电路 (Common-Emitter Amplifier)

1.1 基本结构与工作原理

以 NPN 型 BJT 为核心，发射极交流接地（或经电阻接地），信号从基极输入、集电极输出。典型结构包含分压式偏置、射极负反馈电阻 R_E 和集电极负载电阻 R_C 。

- 直流偏置：**使晶体管工作在放大区。
- 小信号放大：**输入电压 v_{in} 叠加在基极-发射极电压 V_{BE} 上，产生小信号基极电流 i_b ；经电流放大 $i_c = \beta i_b$ ，在 R_C 上产生压降，集电极电压 $v_{out} = V_{CC} - i_c R_C$ 。
- 电压增益（忽略 r_o ）：**

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} \approx -\frac{R_C \parallel R_L}{r_e + R_E}$$

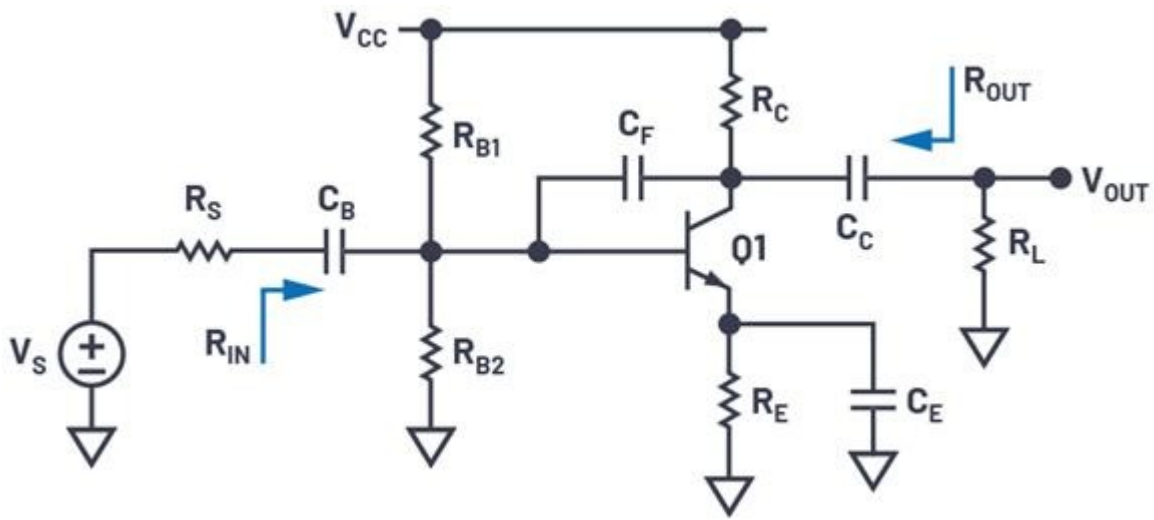
其中 $r_e \approx 25\text{mV}/I_C$ ， R_E 为未旁路的射极电阻。负号表示反相。

1.2 主要特性

- 输入阻抗：**中等 ($R_{in} \approx R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel [\beta(r_e + R_E)]$)，典型值几 k Ω 。
- 输出阻抗：**较高 ($R_{out} \approx R_C$)。
- 类型：**反相电压放大器，同时具有电流放大能力。
- 频率响应：**受密勒效应（集-基电容 C_{μ} 被放大）影响，高频特性一般。
- 功能定位：**最本质的功能是**电压放大**，是分立元件放大器中最常用的组态。如果输入信号是电流（高内阻源），它也能实现跨阻放大，但输入阻抗不够理想。

1.3 典型电路实例

实例一：教材标准分压偏置共射电路



元件功能：

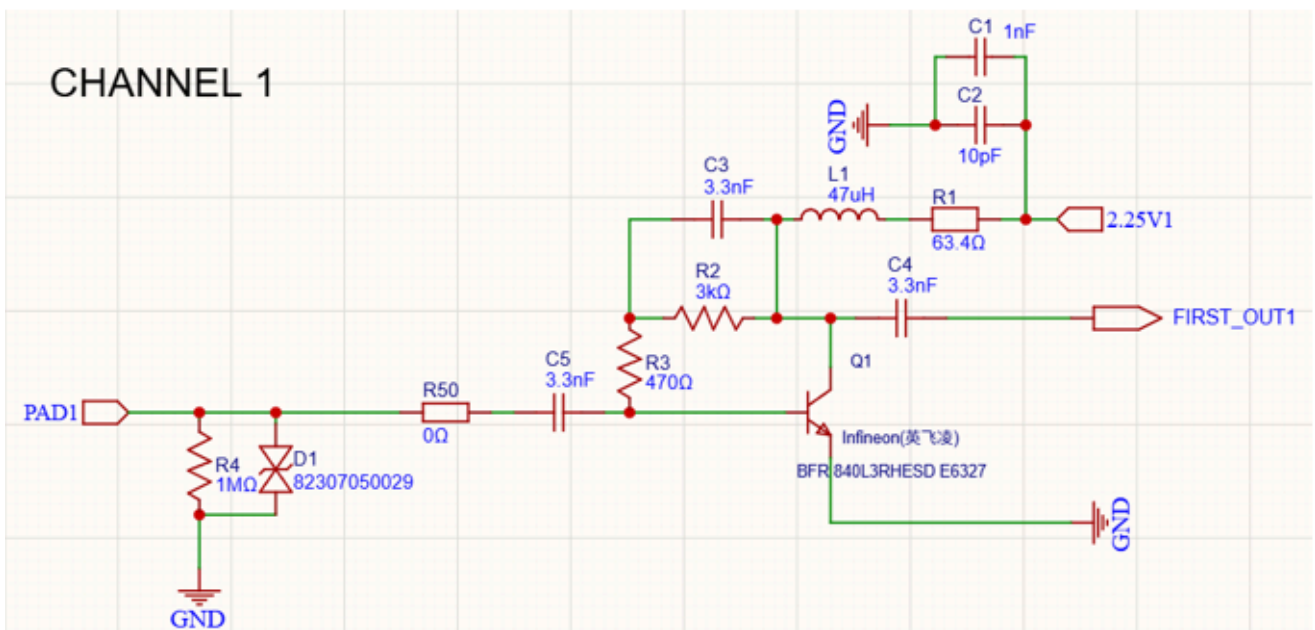
元件	功能
Q1 (NPN 三极管)	核心放大管，发射极公共接地，输入基极、输出集电极
R_{B1} 、 R_{B2}	基极分压电阻，稳定静态工作点
R_C	集电极负载，把集电极电流变化转为电压
R_E 、 C_E	发射极电阻直流稳点；旁路电容 C_E 交流接地，提升交流增益
C_B 、 C_C	输入/输出隔直电容，隔断前后级直流电位，仅传递交流信号
C_F	高频补偿电容，抑制高速脉冲自激，适配 500 ps 快脉冲场景

核心公式（旁路电容充分交流短路时）：

$$A_v = -g_m R_C$$

负号代表输出与输入相位反相 180° 。

实例二：射频高速共射（LGAD 一级前放）



电路说明： LGAD 电流输入 → 隔直 C5 → R2/R3 基极分压 → BFR840 高速射频 NPN；集电极 L1 射频扼流 + R1 阻尼 + LC 匹配网络，输出 FIRST_OUT1。用电感替代纯电阻做集电极负载，**高频损耗极低**，适合 ns 级探测器脉冲。

2. 电压放大器 (Voltage Amplifier)

2.1 广义定义

电压放大器是一个**功能模块**，要求：

- **输入为电压，输出为电压；**
- **增益：** $A_v = V_{out}/V_{in}$ (无量纲)；
- **理想特性：** 无穷大输入阻抗 (不取电流)、零输出阻抗 (负载不影响输出)、带宽无穷。

现实中，电压放大器可由**运放 + 反馈网络**实现，也可由分立晶体管电路 (如共射、共源、共基、运放电路) 构成。它描述的是一种**信号处理功能**，而非**特定电路拓扑**。

2.2 常见实现

1. 运算放大器电路

- **同相放大器：** $A_v = 1 + R_f/R_g$ ，高输入阻抗。
- **反相放大器：** $A_v = -R_f/R_g$ ，输入阻抗约等于 R_{g0}

2. 晶体管基本组态

- **共射/共源：** 高电压增益，输入阻抗中等，输出阻抗较高。
- **共集/共漏 (射随器)：** 电压增益 ≈ 1 ，高输入阻抗，低输出阻抗，用于缓冲。
- **共基/共栅：** 电压增益高，输入阻抗极低，同相放大。

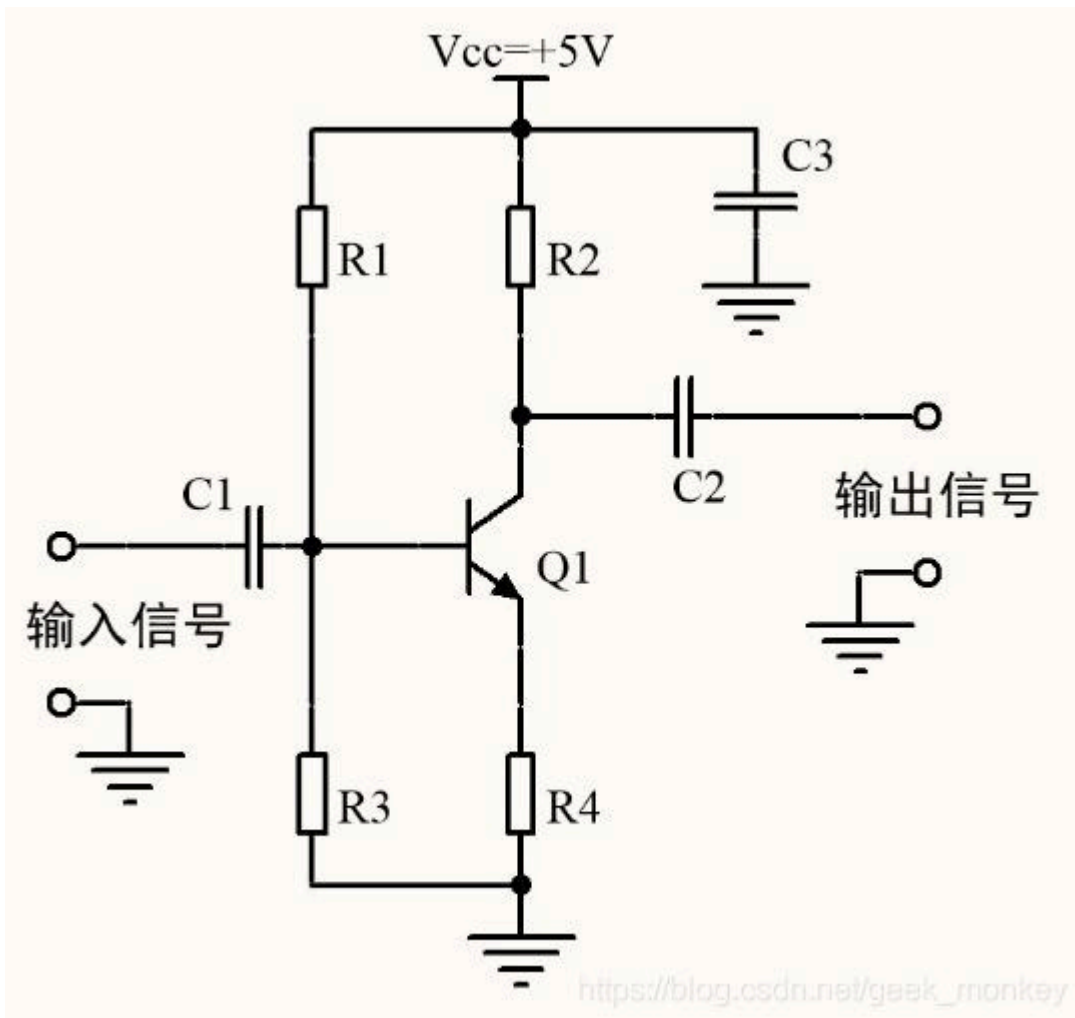
因此，**共射放大器是电压放大器的一种特定实现形式**，属于“有电压放大能力的电路”。

2.3 关键参数

- 电压增益 A_v
- 输入/输出阻抗
- 带宽、噪声、线性度

2.4 典型电路实例

实例一：通用运放同相电压放大器 (基础拓扑)



核心特性：

- 输入电压 V_{in} ，输出电压：

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_F}{R_G}$$

增益无量纲（倍）；

- 输入阻抗极高、输出阻抗极低，只放大电压幅度，不能直接处理微弱电流；
- 适合已有完整电压信号、需要缓冲放大的场景。

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

3.1 定义与理想模型

跨阻放大器将输入电流转换为输出电压，增益称为跨阻 $Z_f = V_{out}/I_{in}$ ，单位为 Ω 。

理想模型：

- **零输入阻抗**（或极低）：使信号电流全部流入放大器，避免被源内阻分流。
- **零输出阻抗**：提供电压驱动能力。

3.2 经典实现：运放 + 反馈电阻

光电二极管电流 I_{in} 直接注入运放反相输入端，反馈电阻 R_f 跨接在输出与反相端之间：

- 由于"虚地"，反相端电压维持在地电位，输入阻抗接近 0。
- 输出 $V_{out} = -I_{in} \cdot R_f$ 。
- 带宽受限于 R_f 和输入寄生电容 C_{in} ，常需在 R_f 上并联电容进行补偿。

3.3 分立元件实现

- **共基极放大器**：发射极输入（电流），集电极输出（电压）。发射极看入的输入阻抗很低（ $r_e \parallel R_E$ ），天然适合做 TIA。跨阻增益约等于 R_{CO} 。
- **共射电路用作 TIA**：基极输入电流，输出集电极电压，跨阻增益为 $-\beta R_{CO}$ 。但输入阻抗是 r_π （中等），要求信号源内阻远大于 r_π ，否则电流分流严重。因此一般不将简单共射称为优质 TIA，除非源阻抗极高。
- **改进型**：共射-共基组合、带有并联电压负反馈的共射电路（反馈电阻跨接在集电极与基极之间），此时输入阻抗降低，稳定增益，可构成性能较好的 TIA。

3.4 关键指标

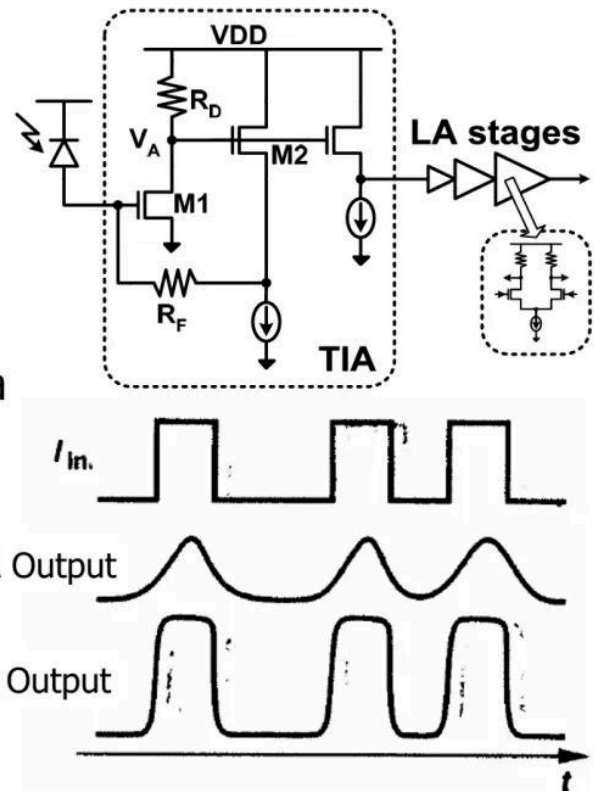
- 跨阻增益 (Ω)
- 输入阻抗 (越小越好)
- 带宽 (受输入电容和 R_f 限制)
- 噪声电流/电压 (决定微弱信号检测能力)

3.5 典型电路实例

实例一：运放标准光电/探测器 TIA (最经典)

Optical Receiver Technology

- Photodetectors convert optical power into current
 - p-i-n photodiodes
 - Waveguide Ge photodetectors
- Electrical amplifiers then convert the photocurrent into a voltage signal
 - Transimpedance amplifiers
 - Limiting amplifiers
 - Integrating optical receiver



工作原理:

- 输入：LGAD/光电二极管微弱电流 I_{in} ；
- 运放反相端虚地，全部输入电流流过反馈电阻 R_F ；
- 输出电压：

$$V_{out} = -I_{in} \cdot R_F$$

增益单位 Ω (跨阻 $R_m = V_{out}/I_{in}$)；

- C_F ：相位补偿电容，抵消探测器结电容，保证电路稳定、拓展带宽，匹配 2 ns 窄脉冲。

适配项目说明： LGAD 输出是电离电流，必须先用 TIA 完成 **电流** \rightarrow **电压转换**，再进电压放大器。

4. 三者的关系与区别

4.1 功能与拓扑的层次

电路/概念	输入信号	输出信号	增益表达式	常用拓扑	输入阻抗要求	LGAD 链路位置
共射放大器	电压（也可勉强接受电流）	电压	$A_v \approx -g_m R_C$	晶体管共射结构	中等（kΩ ...	一级前放，分立简易 TIA 预放大
电压放大器	电压	电压	$A_v = V_{out}/V_{in}$	运放同相/反相、仪表放大器、共射/共源	越高越好（理想 ∞）	二级放大，驱动示波器 50 Ω 负载
跨阻放大器 TIA	电流	电压	$Z_f = V_{out}/I_{in}$ (Ω)	运放 + R_f 、共基、共射 + 并联反馈	越低越好（理想 0）	探测器最前端，电流转电压

4.2 相互转化与关联

1. **共射是电压放大器的一个子集**：它可以作为独立的电压放大级，也可以和运放组合使用。其功能本质是电压放大。
2. **TIA 可以由电压放大器改造而来**：给电压放大器的输入端并联一个电阻 R ，使输入电流流过 R 产生电压 $V = I \cdot R$ ，再被电压放大器放大，总的 $V_{out} = (I \cdot R)A_v$ ，这便形成了最原始的跨阻放大功能。但该方式输入阻抗为 R ，噪声、带宽均不理想。
3. **共射电路配上并联-电压负反馈（电阻连接集电极与基极）即成为一个 TIA**：此时输入阻抗降低，闭环跨阻约为 $-R_f$ （如果开环增益足够高），其行为与运放 TIA 相似，只是开环增益有限。
4. **共基电路天然是 TIA**：输入阻抗极低（ r_e 量级），直接接受电流输入，输出电压等于 $I_{in}R_C$ ，是一种简单而高性能的分立 TIA。

4.3 核心区别总结

- **信号域**：电压放大器 vs TIA 区分了**输入信号是电压还是电流**。共射放大器通常工作在电压域，但也可在电流域工作（此时称 TIA）。
- **反馈与端口阻抗**：电压放大器追求高输入阻抗；TIA 追求**低输入阻抗**（以吸收全部电流）。这是两者在设计理念上的根本不同。
- **应用出发点**：共射电路是"基础积木块"，侧重提供电压增益；TIA 是"信号调理模块"，侧重电流-电压精确转换；电压放大器是"宽泛的功能分类"。

简而言之：**共射放大电路是"如何用一个晶体管做电压放大"**；**电压放大器是"我需要电压 → 电压的盒子"**；**跨阻放大器是"我需要电流 → 电压的盒子"**。共射电路可以用来实现后两种盒子，但专用的 TIA 拓扑（尤其是基于运放或共基结构）在电流转换的性能上远优于普通共射电路。

5. 典型应用场景

5.1 共射放大器

- **音频前置放大**：离散设计的高增益电压放大级。
- **传感器接口**：将微弱的电压信号（如动圈麦克风）放大到可处理的电平。
- **中高频放大**：在射频电路中，适当匹配后可提供增益（虽然共基、共射-共基更常见）。
- **反相缓冲**：需要反相且带增益的场合。

5.2 电压放大器

- **几乎所有模拟信号链**：运算放大器构成的同相/反相放大、仪表放大器、差分放大器。
- **数据采集前端**：ADC 驱动，信号缩放、电平搬移。
- **音频功放**：电压放大级 + 功率输出级。
- **滤波器**：有源滤波器的核心增益单元。

5.3 跨阻放大器 TIA

- **光电检测**：光电二极管、光电倍增管（PMT）的前置放大器，将光电流转换为电压（光纤通信接收端、激光雷达）。
- **生化传感器**：葡萄糖试纸、DNA 测序仪中的微电流检测（fA~nA 级）。
- **精密仪器**：扫描隧道显微镜（STM）的探针电流放大、质谱仪法拉第杯接收器。
- **阻抗测量**：通过注入电流并测量电压，TIA 可作为电流-电压转换核心。

6. 补充关键答疑

6.1 为什么 GALI-52+ 刚好满足 10 倍？

dB 换算：增益 $G(\text{dB}) = 20 \log_{10} A_v$ ，20 dB 对应 $A_v = 10$ ，完全匹配题目二级 10 倍需求。

6.2 为什么高压必须用 DSHP01TSGER 馈通滤波器，不能只用电容？

单纯隔直电容只能阻断直流，但无法滤除高压电源引入的高低频噪声；DSHP01 内置 LC 滤波网络，同时实现高压馈入、交流信号隔离、高低频噪声滤波，满足题目“高压接口考虑高频、低频滤波”硬性要求。

6.3 为什么电源同时并联大容量电解 + 小容量陶瓷电容？

电解电容等效串联电感 ESL 大，只能滤低频纹波；陶瓷电容 ESL 极小，负责滤 MHz/GHz 高频噪声；两者并联兼顾高低频，补偿电容非理想寄生参数。

6.4 500 ps 快脉冲为什么全程 50 Ω 阻抗匹配？

高速脉冲边沿包含极高频率分量，阻抗不匹配会产生信号反射，脉冲出现振铃、过冲、边沿变缓，破坏 500 ps 上升沿指标。因此前级 LC 匹配网络、GALI 输入输出、示波器全部采用 50 Ω 射频标准。

作业二、LGAD单通道前放板原理图完整设计报告（适配3模块整合图纸）

一、设计总览（匹配作业二全部要求）

1. 整体三大电路模块划分（对应图纸布局）

- 模块1：5V可控低压电源系统**（图纸左上区域，MOS板载开关+TPS79901稳压）
- 模块2：LGAD高压输入保护 + BFR840一级共射放大电路**（图纸左侧中下区域，信号源+前级放大）
- 模块3：GALI-52+二级射频放大输出电路**（图纸右侧区域，FIRST_OUT1 后级放大+示波器接口）

2. 三大核心通路

1. 信号通路

HV_IN高压输入 → 穿心馈通滤波+高压保护网络 → PAD1(LGAD焊盘) → BFR840一级放大 → FIRST_OUT1 → GALI-52+二级放大 → SMA示波器输出接口

2. 低压电源通路（两路供电）

外部5V_IN → 2N7002板载电源开关 → 5V_MAIN总电源总线

- 支路1：5V_MAIN → TPS79901DDCR → 稳定2.25V，为BFR840一级放大供电
- 支路2：5V_MAIN → 470nH射频扼流圈，直接为GALI-52+二级放大供电

3. LGAD高压通路

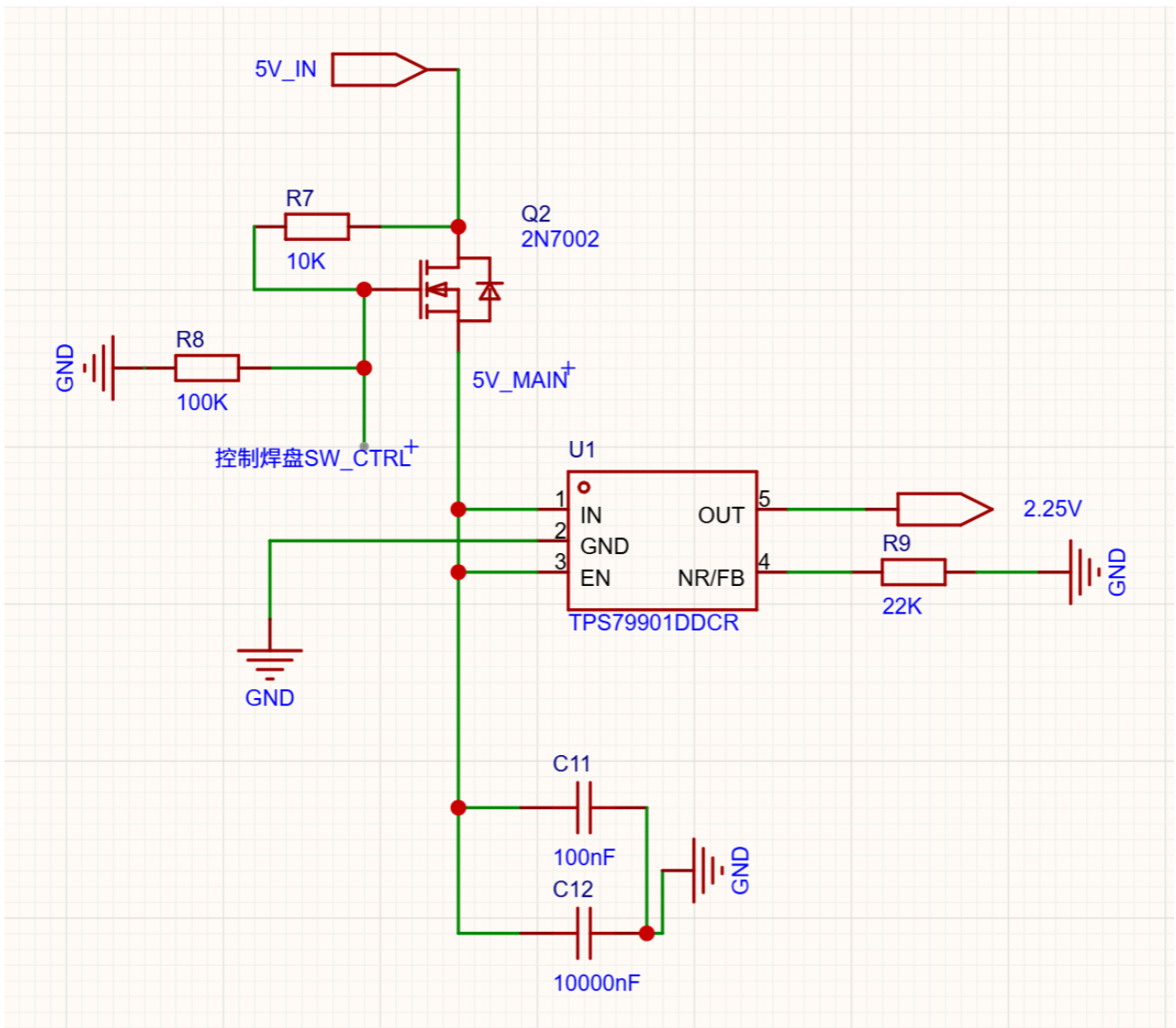
独立外部高压源HV_IN → NFM21CC102R1H3D穿心馈通高低频滤波 → DSHP01TSGER高压拨码开关 → PAD1(LGAD高压/信号共用焊盘)

3. 作业硬性要求落地对照

- 低压5V输入，采用2N7002 MOS管实现板载硬件开关；
- 配置独立LGAD直流高压接口，穿心馈通集成高低频滤波，搭配TVS、泄放电阻做浪涌安全防护；
- FIRST_OUT1 后端使用商用射频芯片GALI-52+做二级放大，电压增益约10倍，匹配500ps上升沿、2ns窄脉冲；
- 全部使用题目指定核心器件：TPS79901DDCR、GALI-52+、DSHP01TSGER；
- 全电路搭配隔直电容、匹配电阻、滤波电感/磁珠，抵消无源器件寄生电感、寄生电容等非理想参数；
- 输出端配置标准SMA接口，可直连示波器采集波形。

二、分模块详细说明

模块1：5V板载可控低压电源系统



1. 包含器件

- 5V_IN输入焊盘、Q2(2N7002 N沟道MOS管)、R7=10k Ω 、R8=100k Ω 、SW_CTRL控制焊盘；
- U1(TPS79901DDCR)、R9=22k Ω 、C11=100nF、C12=10000nF。

2. 电路接线逻辑

(1) 板载电源开关单元

- **输入：** 5V_IN \rightarrow Q2(2N7002) D漏极引脚
- **输出：** Q2 S源极引脚 \rightarrow 网络 5V_MAIN（整机低压供电主干）
- **栅极控制（三路并联）：**
 - G极 \rightarrow R7(10k Ω) 上拉至5V_IN
 - G极 \rightarrow R8(100k Ω) 下拉至全局GND
 - G极引出导线 \rightarrow SW_CTRL外接控制焊盘
- **电源总线滤波：** 5V_MAIN 并联 C11(100nF)、C12(10000nF) 至GND，抑制高低频电源纹波

工作逻辑：

- SW_CTRL悬空/接地：栅极被100kΩ拉至0V，MOS关断，5V_MAIN无输出，一、二级放大全部断电；
- SW_CTRL接入5V高电平：栅极电位抬升，MOS完全导通，5V输入输送至5V_MAIN，全板低压电路上电。

(2) TPS79901 5V转2.25V稳压单元

TPS79901引脚定义：1=VIN、2=EN、3=GND、4=NR/FB反馈、5=OUT输出

• 输入侧：

5V_MAIN → U1 1脚VIN、U1 2脚EN使能脚（上电自动开启稳压）

U1 3脚GND直接连接全局公共地

• 反馈分压网络（锁定输出2.25V）：

U1 5脚OUT → 内部输出基准1.225V分压回路，外部R9=22kΩ下拉至GND，精准输出2.25V

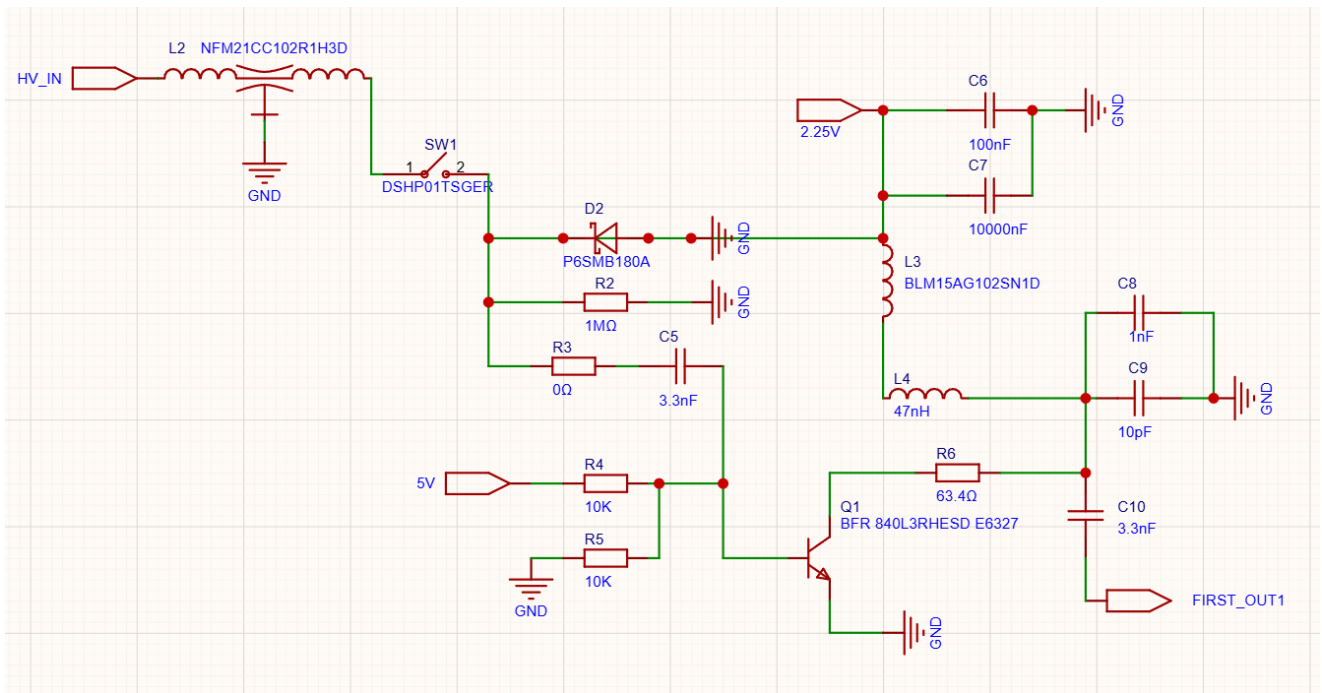
• 输出供电：

U1 5脚OUT引出2.25V网络，向下为BFR840一级放大电路提供静态工作电压

3. 器件选用理由

- **2N7002**：SOT-23贴片N沟道MOS，耐压60V、额定电流200mA，满足电路负载，实现无插拔式板载电源开关；10k/100k分压电阻防止栅极悬空误触发、限流保护MOS栅极；
- **TPS79901DDCR**：题目指定超低噪声LDO，适配微弱脉冲放大电路，内置精密1.225V基准，可稳定输出2.25V匹配三极管静态点；
- **大小容值并联电容**：补偿电容寄生电感，同时滤除5V电源低频波动与高频射频噪声，降低脉冲基线噪声。

模块2：LGAD高压输入保护 + BFR840一级共射放大电路



本模块分为两个子单元：高压滤波保护单元、BFR840预放大单元。

子单元1：LGAD高压输入滤波保护单元

包含器件

- HV_IN高压输入焊盘、L2(NFM21CC102R1H3D三端穿心馈通)、SW1(DSHP01TSGER拨码开关)、D2(P6SMB180A单向高压TVS)、R2=1MΩ泄放电阻、R3=0Ω串联电阻、C5=3.3nF隔直电容

接线拓扑

- HV_IN高压输入 → L2穿心馈通（内置π型LC高低频滤波） → SW1高压开关左端
- SW1右端节点定义为 PAD1（LGAD探测器高压+信号共用焊盘）
- PAD1 三路并联保护支路：
 - PAD1 → D2(P6SMB180A)阳极；D2阴极接GND，高压浪涌、静电防护
 - PAD1 → R2(1MΩ)电阻 → GND，断电释放PAD1残余高压，消除基线漂移
 - PAD1 → R3(0Ω) → C5(3.3nF)隔直电容 → Q1(BFR840)基极，隔绝百伏直流高压，仅传输交流脉冲信号
- LGAD探测器独立接地焊盘：直接连接全局GND

器件选用理由

- **NFM21CC102R1H3D穿心馈通**：集成π型滤波，同步滤除高压线路低频工频纹波与高频射频干扰，适配500ps超窄脉冲场景；
- **DSHP01TSGER**：题目指定高压开关，可控切断LGAD偏置高压，调试、检修更安全；
- **P6SMB180A高压TVS**：耐压180V匹配LGAD最大工作偏压，低压ESD管耐压不足无法在此处使用，防止瞬态高压击穿探测器与后级三极管；

- **3.3nF隔直电容**：阻断PAD1直流高压流入放大管，仅让交流脉冲信号通过，保护BFR840不被高压烧毁。

子单元2：BFR840一级共射预放大单元（题目给定原始放大电路）

包含器件

- Q1(BFR840 NPN射频三极管)、R4=10k Ω 、R5=100k Ω 、L3(BLM15AG102SN1D铁氧体磁珠)、L4=47nH射频电感、R6=63.4 Ω 负载电阻、C8=100nF、C9=10pF、C10=3.3nF、网络标号 FIRST_OUT1
- 三极管引脚：B=基极(信号输入)、E=发射极、C=集电极(供电+放大信号输出)

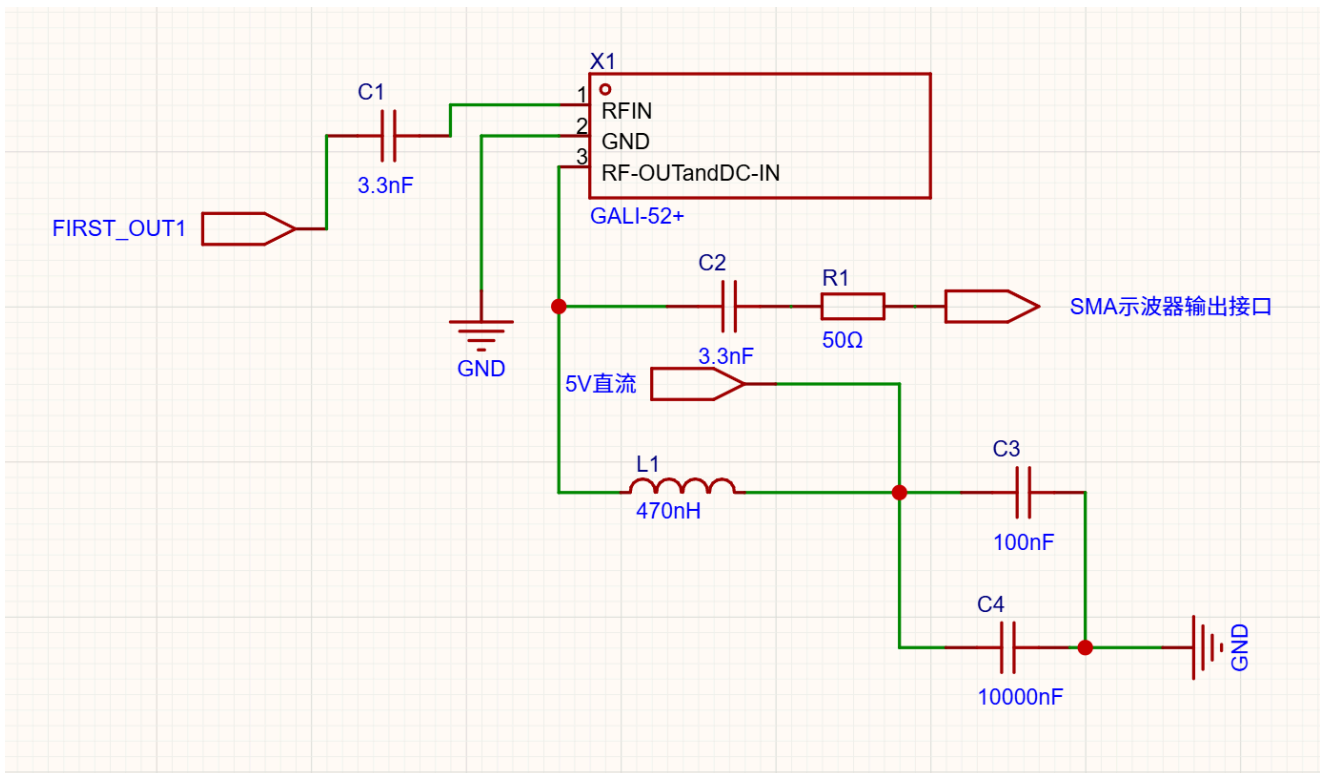
接线拓扑

- **基极B（信号输入+静态分压偏置）**：
 - C5（高压模块输出脉冲信号）→ Q1基极B
 - 2.25V稳压电源 → R4(10k Ω) → Q1基极B
 - 全局GND → R5(100k Ω) → Q1基极B，共同搭建三极管线性放大静态工作点
- **发射极E**：Q1发射极E直接连接全局GND
- **集电极C（供电回路+放大信号输出）**：
 - 2.25V供电网络 → L3磁珠 → L4(47nH)射频电感 → R6(63.4 Ω) → Q1集电极C
 - 负载节点滤波：L4与R6中间节点并联 C8(100nF)、C9(10pF)至GND，抵消器件寄生参数，抑制高频谐振、波形振铃
- **一级放大信号输出**：负载节点引出 C10(3.3nF)隔直电容 → 网络标号 FIRST_OUT1，送入 GALI-52+二级放大输入

器件选用理由

- **BFR840射频三极管**：超高带宽，无失真放大上升沿500ps、脉宽2ns的窄高速脉冲；
- **R4/R5分压电阻**：设置三极管静态工作点，保证脉冲全程线性放大，避免信号削顶失真；
- **L3磁珠**：吸收放大电路产生的高频射频噪声，防止噪声倒灌进2.25V稳压回路引发电路自激；
- **L4电感+R6电阻**：构成射频集电极负载，匹配脉冲阻抗，提升一级电压增益；
- **C8/C9对地小电容**：补偿电感、三极管寄生电容，消除高速脉冲反射振铃；
- **C10隔直电容**：隔断2.25V直流电位，仅将交流放大脉冲传递至后级二级放大器。

模块3：GALI-52+二级射频放大输出电路



1. 包含器件

- X1(GALI-52+商用射频放大器，题目指定)、C1=3.3nF、C2=3.3nF、R1=50Ω标准匹配电阻、L1=470nH射频扼流圈、C3=100nF、C4=10000nF、SMA示波器输出接口
- GALI-52+引脚定义：Pin1=RF_IN射频输入、Pin2=GND、Pin3=RF_OUT+VCC供电复用引脚、Pin4=GND

2. 完整接线拓扑

- **信号输入（承接一级放大输出）：**
网络 FIRST_OUT1 → C1(3.3nF)隔直电容 → X1 Pin1射频输入引脚
- **放大器射频接地（多点接地降低寄生电感）：**
X1 Pin2、X1 Pin4 分别独立走线连接全局GND
- **Pin3复用引脚分为两路独立支路：**
 - **支路1：射频信号输出至示波器**
X1 Pin3 → C2(3.3nF)隔直电容 → R1(50Ω)阻抗匹配电阻 → SMA示波器输出接口
 - **支路2：5V直流供电（取自整机5V_MAIN总线）**
X1 Pin3 → L1(470nH)射频扼流圈 → 5V_MAIN 低压总线
- **供电滤波：**
扼流圈前端 5V_MAIN 并联 C3(100nF)、C4(10000nF)至GND，滤除电源高低频噪声

3. 器件选用理由

- **GALI-52+：**题目指定商用射频放大芯片，GHz级带宽完全覆盖500ps上升沿窄脉冲，稳定电压增益约10倍，满足二级放大增益要求；
- **C1/C2前后级隔直电容：**隔离一、二级放大直流静态电位，避免两级电路电压互相干扰；

- **470nH射频扼流圈**：通直流、阻高频，5V直流可正常给芯片供电，同时阻断放大后的高频脉冲倒灌进入5V电源总线，防止全板噪声恶化；
 - **50Ω匹配电阻**：高速脉冲标准50Ω阻抗系统，消除信号传输反射、波形振铃，保证示波器采集波形完整不失真；
 - **并联滤波电容**：抑制5V供电纹波，保证放大器增益稳定，不引入额外基线噪声。
-

三、整体设计思路总结

1. 电源分层隔离设计

高压HV_IN与低压5V两套电源完全电气隔离，仅共用统一全局GND；低压侧增加MOS可控总开关，可一键切断所有放大电路低压供电，调试安全便捷；采用LDO线性稳压输出低噪声2.25V，适配微弱粒子脉冲放大场景。

2. 高压前端防护+滤波

LGAD高压输入端搭配穿心馈通一体化滤波，同时处理低频电源干扰与高频射频噪声；配套TVS浪涌保护、1MΩ泄放电阻，规避高压上电、断电瞬间损坏探测器的风险。

3. 两级射频放大架构匹配高速脉冲

第一级BFR840三极管预放大完成微弱信号初步抬升；第二级GALI-52+专用射频芯片提供固定10倍增益，带宽匹配500ps超短上升沿脉冲；全程使用隔直电容、阻抗匹配电阻、射频扼流圈，解决高速信号反射、交直流互相串扰问题。

4. 无源器件补偿非理想特性

全电路搭配大小容值并联电容、射频电感、铁氧体磁珠，抵消电容寄生电感、电感寄生电容、线路寄生参数带来的波形畸变、自激、噪声抬升等问题，满足题目“实际电容、电感并非理想”的设计约束。

5. 标准化输出接口

末端采用通用SMA射频接口，可直接同轴线缆连接示波器，便于实验波形采集与数据观测。