

一、共射放大电路

用三极管为核心搭建的电路，信号从基极输入，从集电极输出，发射极是输入回路和输出回路的公共端，因此叫共射极放大电路

基极电流控制发射极电流， $i_e = (1 + \beta) i_b$

跨阻放大器

就是把输入的电流信号转换且放大为电压信号，相当于流控电压源

标准的结构是运算放大器 + 反馈电阻：

同相端接地，反相端接输入电流，反馈电阻接在输出和反相端之间；

利用运放「虚短虚断」特性，反相端电位等于地电位（虚地），输入阻抗近似为 0；

输入电流无法流入运放内部，只能全部流过反馈电阻；

电压放大器

把输入的电压信号放大，相当于压控电压源

实现方法很多：三极管共射、共基放大、运算放大器放大，差分放大

关系：电压放大器和跨阻放大器可以用共射放大电路实现

电压放大器和跨阻放大器是同一个级别，都是功能电路

区别

电压放大器和共射放大电路输入量都是电压信号，跨阻放大器输入是电流信号，但是三者输出都是电压信号。理想输入阻抗共射放大电路是中等级别（ $k\Omega$ 级）因为输入有基极电流输入电阻无法做到无穷大，又因为等效电阻会被 β 抬升，因此也做不到 0；跨阻放大器理想为 0，因为输入是电流信号，输入电阻为 0 能更好抢夺上一级电流；电压放大器理想输入电阻无穷大，可以和上一级抢夺电压信号。

用处：

共射放大电路：

粒子 / 辐射探测器前置读出（LGAD 电路）、高速光电探测简易接收端

电压放大器：

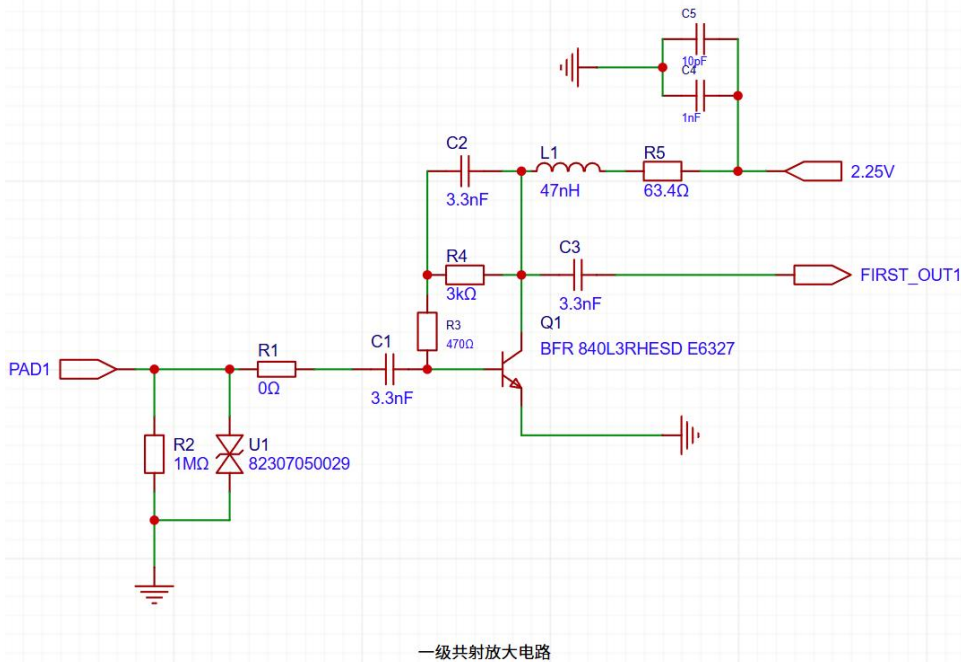
射频信号多级增益放大（两级 GALI-52+）、工业传感器电压信号调理音频放大、音响前置电路

跨阻放大器 TIA：

高能物理硅探测器读出（LGAD/APD/SDD）、光纤通信光接收模块（最主流商用场景）、激光雷达、红外探测系统

对应 LGAD 完整电路

1. LGAD 探测器（输出微弱电流）
2. 共射放大电路（充当分立 TIA）：电流转电压 + 一级放大
3. 广义电压放大器（两级 GALI-52+ 射频 MMIC）：进一步放大电压，驱动示波器 完整链路逻辑：TIA（共射实现）完成电流转换，电压放大器只做幅度提升，二者分工不可互换。



模块 1：一级共射负反馈放大电路（BFR840）

本模块是整个系统的低噪声前置放大级，决定了整体信噪比，对微弱粒子脉冲信号做第一级放大。

Q1：BFR840L3RHESD 射频三极管

核心作用：信号放大核心器件，将 LGAD 输出的毫伏级微弱脉冲信号进行第一级电压放大。

选型理由：采用 SiGe HBT 工艺，特征频率 $f_T = 75$ GHz，带宽极高，完美适配 2ns 窄脉冲（等效带宽约 500MHz）；内置 ESD 保护，适配探测器前端易受静电冲击的场景；最低噪声系数仅 0.65dB，保证第一级信噪比最优（系统噪声主要由第一级决定）；支持低电压工作，完美适配 2.25V 供电。

R2（1MΩ）

核心作用：LGAD 传感器直流泄放电阻，为传感器提供直流偏置回路，建立静态电位，避免传感器浮空积累电荷导致基线漂移。

参数理由：1MΩ 大阻值既可以泄放直流电荷，又不会对微弱脉冲信号造成明显分流，保证信号尽可能多地进入放大级；同时限制高压偏置的漏电流，降低静态功耗。

U1（PESD5V0S1BA）

核心作用：双向 ESD 保护器件，并联在输入端口与地之间，泄放输入端的静电和浪涌电压，保护后续 BFR840 不被静电击穿。

选型理由：SOD-323 小封装；双向无极性，正反接均有效；结电容仅 0.35pF，寄生参数极低，不会衰减高频脉冲信号；5V 击穿电压刚好匹配后级低压电路的耐压上限。

R1 (0 Ω)

核心作用：调试预留位，零欧电阻等效为导线，后期调试时可替换为匹配电阻、电感来优化输入匹配或调整信号幅度，无需重新制版。

参数理由：0 Ω 不影响信号传输，预留设计灵活性，是高速模拟电路的常规设计手段。

C1 (3.3nF, NP0 材质)

核心作用：输入隔直耦合电容，隔离 LGAD 的高压直流偏置，只允许交流脉冲信号通过进入三极管基极，防止高压串入放大级烧毁芯片。

参数理由：3.3nF 在几百 MHz 频段下阻抗极低，对 2ns 脉冲几乎无衰减；NP0 材质温度稳定性好、高频损耗小，不会造成脉冲波形畸变。

R3 (470 Ω)

核心作用：基极下偏置电阻，与负反馈电阻 R2 配合，共同决定三极管的静态工作点，为基极提供直流通路。

参数理由：470 Ω 配合 3k Ω 反馈电阻，可设置合适的基极电流，让三极管稳定工作在放大区，同时兼顾输入阻抗和噪声性能。

R4 (3k Ω) 与 C2 (3.3nF, NP0) 并联网路

核心作用：构成电压并联负反馈，是本模块的核心拓扑。

R2：同时提供直流 + 交流负反馈。直流负反馈稳定静态工作点、抑制温漂；交流负反馈拓展带宽、降低非线性失真、稳定电压增益。

C3：交流反馈加速电容，对高频信号近似短路，让高频信号直接通过 C3 形成反馈，进一步拓展高频带宽，优化脉冲上升沿响应。

参数理由：3k Ω 反馈电阻配合输入阻抗，设定合理的闭环增益；3.3nF 保证目标频段内充分交流反馈，同时不影响直流工作点。

L1 (47nH, 绕线电感)

核心作用：集电极射频扼流圈 (RFC)，通直流、阻交流。让 2.25V 直流供电顺利加到集电极，同时阻止高频脉冲信号流向电源网络，避免信号被电源旁路短路。

参数理由：47nH 在几百 MHz 下感抗充足，可有效隔离射频信号；绕线电感高频特性优于叠层电感，损耗小、Q 值高。

C3 (3.3nF, NP0)

核心作用：集电极高频旁路电容，同时参与输出匹配，将集电极的高频干扰泄放到地，优化高频响应，抑制电路自激。

参数理由：3.3nF 对高频信号低阻抗，NPO 材质保证高频性能稳定，配合 L1 形成谐振网络，优化带宽内的增益平坦度。

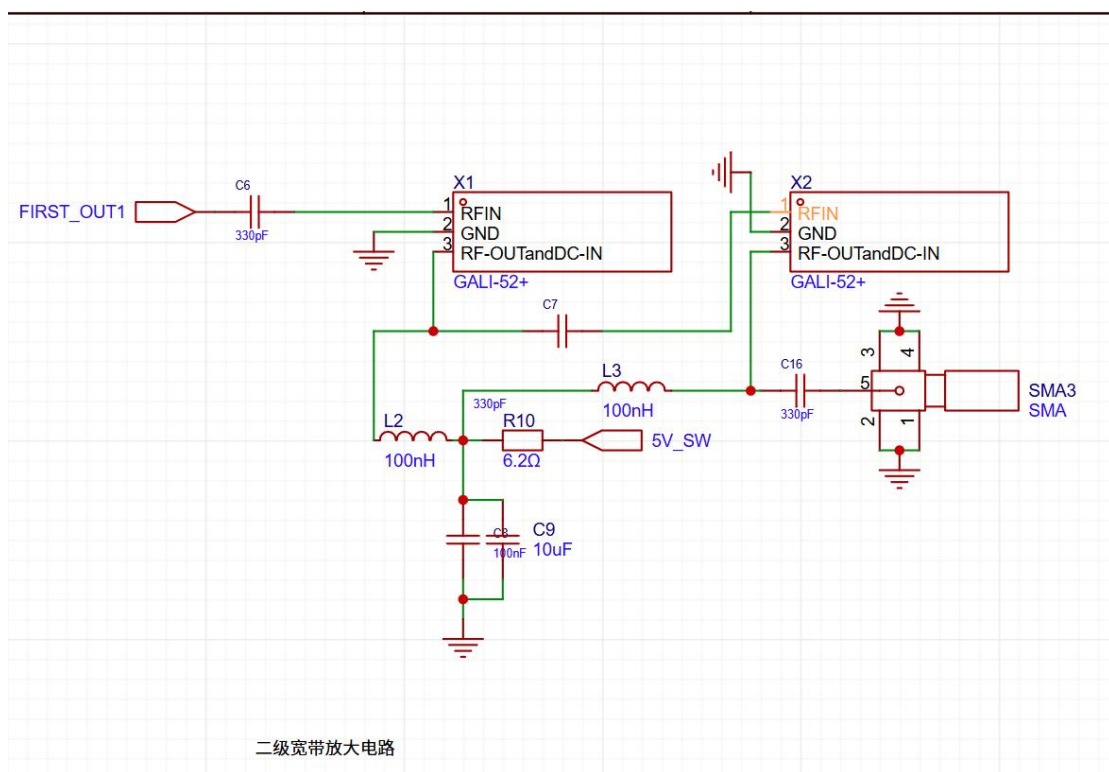
R5 (63.4 Ω) + C4 (1nF) + C5 (10pF) RC 滤波网络

核心作用：对 LDO 输出的 2.25V 进行二次滤波，进一步滤除电源纹波和低频噪声，给集电极提供纯净供电。

参数理由：电阻 + 大小电容构成 RC 低通滤波，抑制能力强于单纯电容滤波；1nF 滤中高频纹波，10pF 滤极高频噪声，并联覆盖全频段纹波。

自己理解：

R4 用来抬高电压避免飘移，同时阻值够大不会对动态信号造成明显影响



二级宽带放大电路

模块 2：二级宽带放大电路（GALI-52+）

本模块为两级级联宽带电压放大电路，作为系统后级增益级，对前级跨阻放大输出的电压脉冲信号进行连续放大，将信号幅值提升至示波器可清晰采集的范围。两级 MMIC 放大器采用同型号级联架构，在保持 DC~2GHz 超宽带宽的同时实现增益叠加，总电压增益可达 27 倍以上，充分满足 10 倍以上放大的设计指标。

X1、X2：GALI-52+ MMIC 射频放大器

核心作用：两颗芯片串联级联，共同完成电压增益叠加。X1 为第一级电压放大，对前级输入的弱电压脉冲进行初步幅值提升；X2 为第二级电压放大，进一步放大信号并驱动后端 $50\ \Omega$ 同轴负载与示波器采集设备。选型理由：采用 Mini-Circuits 工业级 InGaP HBT 工艺宽带放大器，工作带宽覆盖 DC~2GHz，完全覆盖 2ns 窄脉冲的全部频谱分量，保证脉冲波形无畸变 Mini-Circuits；芯片内部集成 $50\ \Omega$ 标准阻抗匹配，无需额外设计外围匹配网络，电路结构简洁、批次一致性好；内置瞬态保护电路，抗静电、抗浪涌能力强，可靠性高；采用 SOT-89 封装，底部带裸露散热焊盘，散热性能优异，支持长时间连续工作。同型号器件级联匹配性最优，增益平坦度高，级间仅需隔直电容即可稳定工作。

C6、C7、C16（330pF，NP0 材质）

核心作用：分别作为输入隔直、级间隔直、输出隔直电容，实现全链路交流耦合。隔离前后各级电路的直流偏置电位，仅允许交流脉冲信号通过，避免各级直流工作点相互干扰；同时阻断芯片引脚的直流供电电压通过信号端口外泄，防止外部负载短路造成供电回路故障。参数理由：330pF 容值在几百 MHz 工作频段下等效阻抗极低，对高速脉冲信号的插入损耗极小；选用 NP0（COG）高频陶瓷电容，介质损耗低、温度稳定性好，不会造成脉冲上升沿、下降沿畸变，保证窄脉冲波形完整性；容值取值适中，不会因容值过大导致低频响应劣化，兼顾高低频段信号传输质量。GALI-52 + 的输出引脚为射频输出与直流供电复用引脚，若级间无隔直电容，前级输出的直流电压会直接叠加到后级芯片的输入引脚，破坏后级内部晶体管的静态偏置，导致芯片工作异常甚至烧毁，因此级间必须串联隔直电容实现“通交流、隔直流”。

L2、L3（100nH，高频绕线电感）

核心作用：两级独立的供电射频扼流圈，分别为 X1、X2 提供独立的直流馈电路径。利用电感“通直流、阻交流”的特性，让直流供电无损耗地加载到芯片引脚，同时对高频脉冲信号呈现高阻抗，阻断射频信号通过公共电源网络形成级间串扰与正反馈，避免电路产生自激振荡。参数理由：100nH 电感在目标工作频段下感抗充足，可有效隔离射频信号与电源通路；选用高频绕线工艺电感，相比叠层电感寄生电阻更小、品质因数 Q 值更高，高频损耗更低，供电效率与隔离效果更优。若两级共用单个扼流圈供电，射频信号会通过公共电源路径形成串扰与正反馈，极易引发高频自激振荡；采用双独立扼流圈可实现两级供电的射频隔离，大幅提升电路工作稳定性。

R10（ $6.2\ \Omega$ ）总供电降压限流电阻

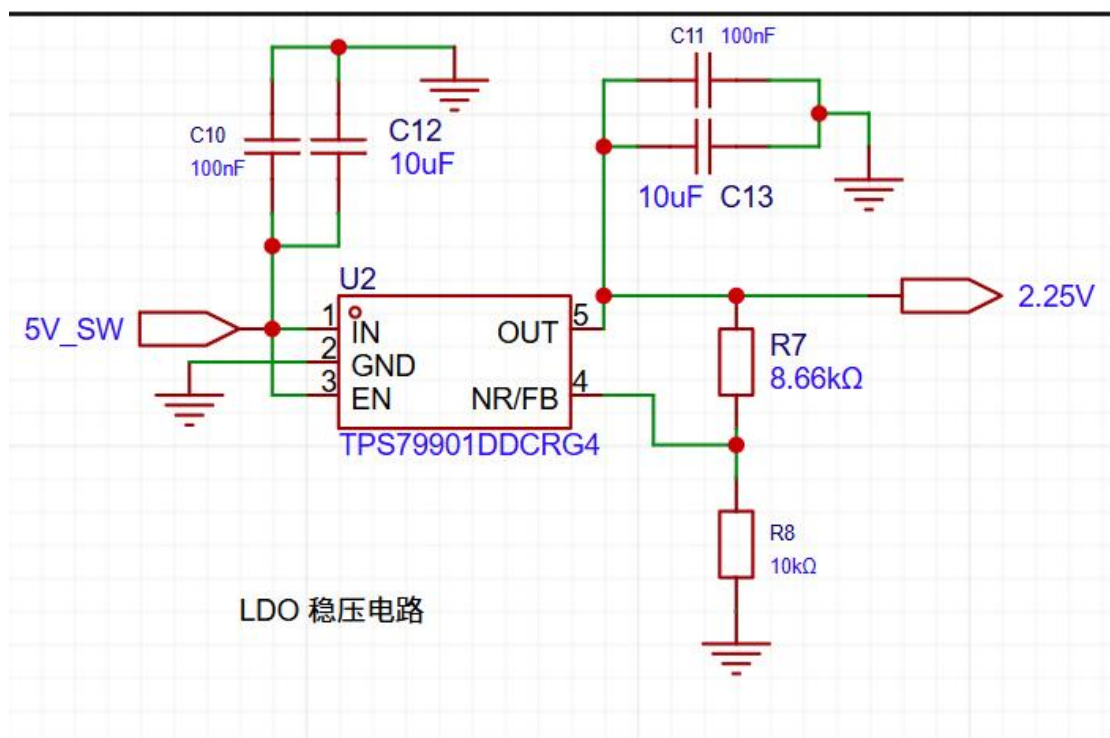
核心作用：串联在 5V_SW 总电源与放大器供电节点之间，实现降压与限流双重功能，为两级放大器提供稳定的额定工作电压，同时限制总工作电流，避免过流损坏芯片。参数理由：根据器件手册，单颗 GALI-52 + 推荐工作电流为 50mA，两级总工作电流约 100mA Mini-Circuits；根据欧姆定律计算， $6.2\ \Omega$ 电阻可产生约 0.62V 压降，5V 输入下芯片供电电压约为 4.38V，完美落在手册推荐的 4.0~4.8V 工作区间内，保证芯片发挥额定增益性能，同时兼顾功耗与发热。

C8 (100nF, X7R) + C9 (10 μF, 钽电容) 公共电源去耦滤波网络

核心作用：并联在两级放大器的公共供电节点与地之间，构成全频段电源滤波网络。100nF 陶瓷电容滤除高频纹波与射频串扰，10 μF 钽电容滤除低频电压波动，抑制负载电流突变带来的电压跌落，保证供电电压平稳，从电源层面抑制级间耦合与自激振荡。参数理由：大小电容并联是射频电路电源滤波的标准配置。大容量钽电容储能密度高、低频滤波效果好，但自身寄生电感较大，高频特性差；小容量陶瓷电容高频特性优异，但储能有限；二者并联可优势互补，覆盖从低频到超高频的全频段噪声抑制，保证供电纯净度。

SMA3 (SMA 同轴连接器) 信号输出接口

核心作用：系统最终信号输出端口，通过同轴电缆连接示波器或数据采集设备，实现 50 Ω 阻抗匹配的信号输出。选型理由：标准 SMA 同轴接口适配通用射频测试线缆，50 Ω 特性阻抗与放大器输出阻抗完全匹配，可减少信号反射与传输损耗；金属外壳全接地设计可提供良好的电磁屏蔽，降低外界电磁干扰对输出信号的影响，保证测试信号质量。



模块 3：LDO 稳压电路 (TPS79901DDCR)

本模块为一级放大提供低噪声、高稳定度的 2.25V 供电。

U1：TPS79901DDCR 低压差线性稳压器

核心作用：将 5V 输入稳压到 2.25V，抑制电源纹波，避免电源噪声耦合进前置放大级。

选型理由：低压差设计，输入输出压差小、效率高；输出电压可调，通过分压电阻灵活设置 2.25V 输出；超低噪声、高电源抑制比（PSRR），非常适合低噪声前置放大器供电；TSOT-23-5 封装体积小。

输入滤波：C9（100nF）+ C12（10 μF）

核心作用：LDO 输入端滤波，平滑输入电压，滤除前级开关和线路引入的纹波，保证 LDO 输入稳定，防止输入波动导致输出振荡。

参数理由：标准输入去耦配置，贴近芯片引脚放置，抑制输入侧高低频噪声。

输出滤波：C8（100nF）+ C10（10 μF）

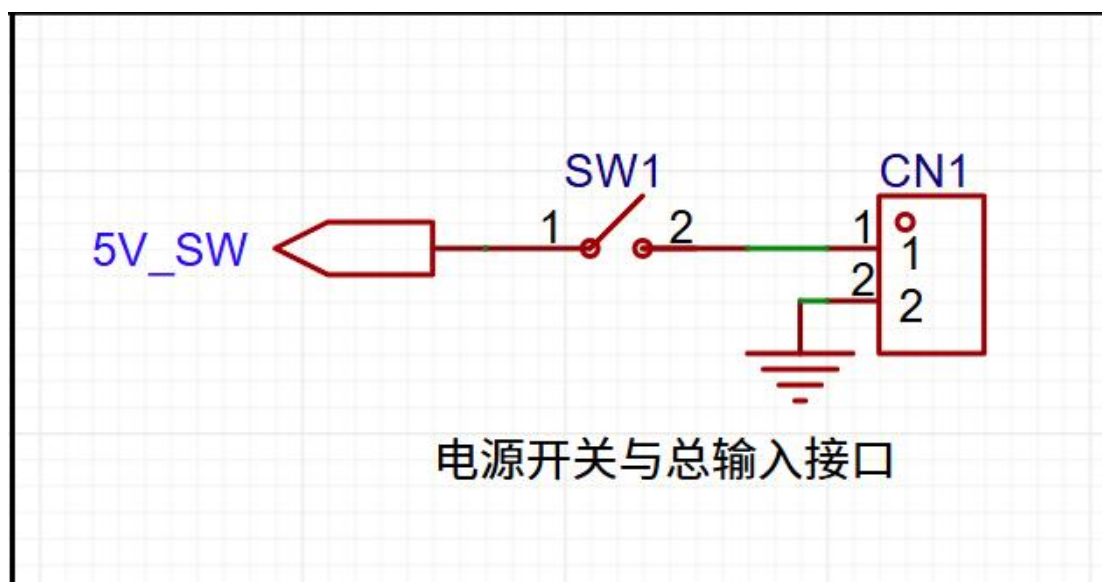
核心作用：LDO 输出端滤波，进一步降低输出纹波，优化瞬态响应；负载电流突变时快速补充电荷，维持输出电压稳定。

参数理由：配合 LDO 内部环路，保证输出电压纹波在 mV 级，满足低噪声放大电路的供电要求。

分压网络：R_top（8.66k Ω）+ R_bottom（10k Ω）

核心作用：输出电压设置网络。通过电阻分压将输出电压的一部分反馈到 FB 引脚，芯片通过闭环调节维持输出电压稳定。

参数理由：根据公式 $V_{out} = V_{ref} \times (1 + \frac{R_{bottom}}{R_{top}})$ ，基准 $V_{ref} = 1.2\text{ V}$ ，计算得输出约 2.24V，与目标 2.25V 误差 < 0.5%；精密电阻保证输出电压精度；k Ω 级阻值兼顾功耗和反馈稳定性。



模块 4：电源开关与总输入接口

本模块是整板低压电源的入口与总开关。

J1（2P 2.54mm 排针）

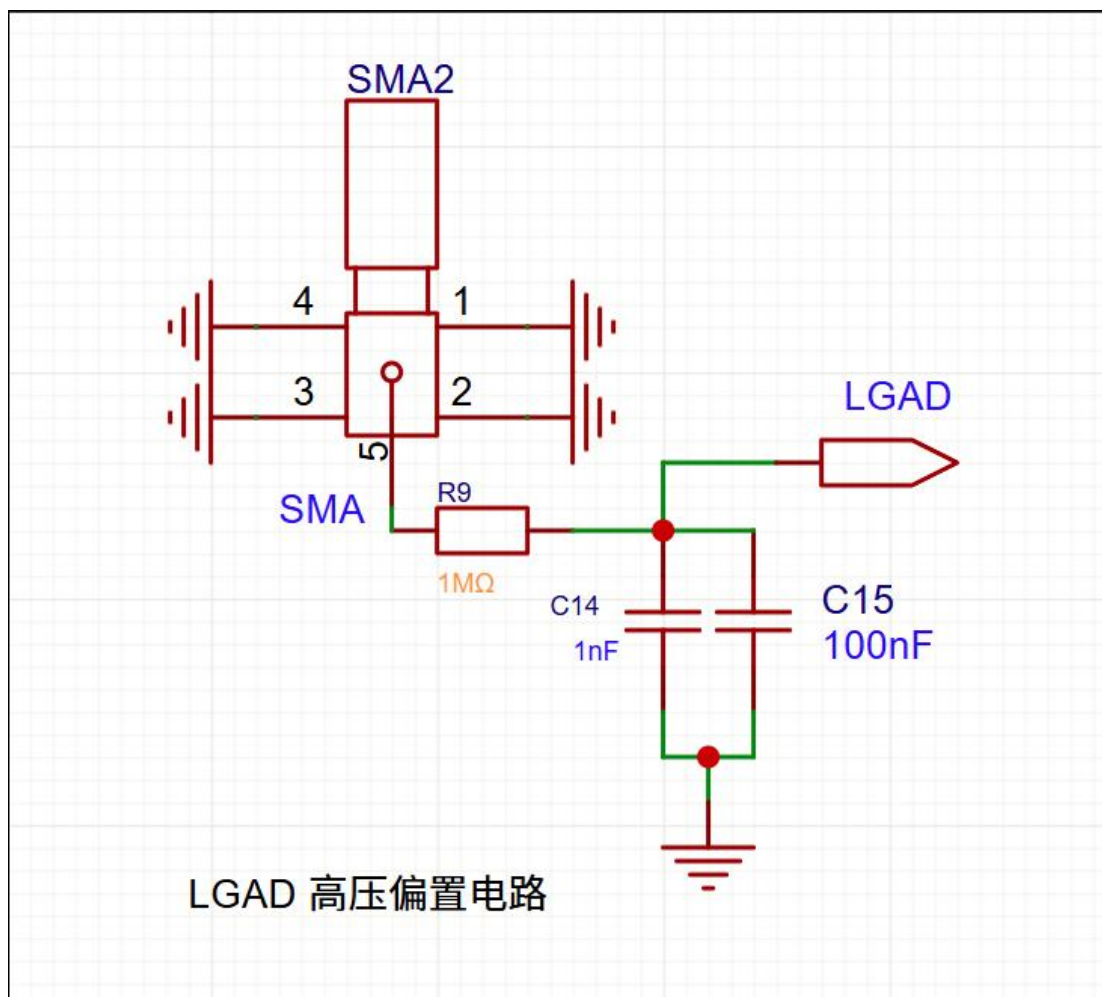
核心作用：整板低压电源输入接口，连接外部 5V 电源适配器。

选型理由：2.54mm 标准间距，通用性强、接线方便；2Pin 满足正负极供电需求。

SW1 (DSHP01TSGER 1 位拨码开关)

核心作用：整板电源总开关，控制 5V 供电通断，无需反复插拔电源接头。

选型理由：贴片式体积小；单刀单掷结构，串联在正极回路，关断后板上完全断电，安全可靠；拨码式操作直观，不易误触。



模块 5: LGAD 高压偏置电路

本模块为 LGAD 探测器提供纯净、安全的高压反向偏置。

J2 (高压 SMA 母座)

核心作用：外部高压电源的输入接口，连接实验室高压源的同轴电缆，将高压偏置导入板内。

选型理由：同轴结构，50 Ω 阻抗匹配，高压传输稳定；金属外壳接地屏蔽，避免电磁干扰；边缘贴片式安装方便，与信号输出 SMA 封装统一，减少器件种类。

R_HV (1M Ω , 1206 高压电阻)

核心作用：高压限流保护电阻，是高压回路的核心保护器件。

参数理由：1MΩ 大阻值将短路电流限制在微安级，即使 LGAD 意外击穿短路，也不会损坏高压源和探测器；1206 高压款耐压 $\geq 500V$ ，满足偏置电压需求；放置在输入侧，第一时间限制故障电流。

C14 (1nF, NPO 1206 500V) + C15 (100nF, X7R 1206 500V)

核心作用：高压滤波网络，滤除高压源的纹波和电磁干扰，给 LGAD 提供纯净的直流偏置。

参数理由：

1nF NPO：滤除高频干扰，NPO 材质高压下性能稳定、损耗小；

100nF X7R：滤除低频纹波，稳定直流偏置；

全部为无极性高压 MLCC，正 / 负高压均可接入，无反接烧毁风险，安全性远高于电解电容；500V 耐压留有充足余量，避免击穿。

自己理解：所有 10pF 和 1nF 并联电路都是滤波电路

对于一级放大电路，R4 和 C2 用于构成反馈网络，电感用于隔交流，470 欧电阻用于提供合适静态工作点

对于二级放大电路，电感用于隔交流防干扰，电容用于隔直，电阻则是限流电阻

LDO 稳压电路主要就是分压电阻提供反馈给芯片保持稳定

LGAD 的高值电阻用于限制电流保护回路