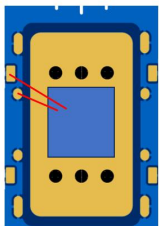


作业一、了解共射放大电路，跨阻放大器，电压放大器，介绍这三个电路的关系、区别、应用场景等。

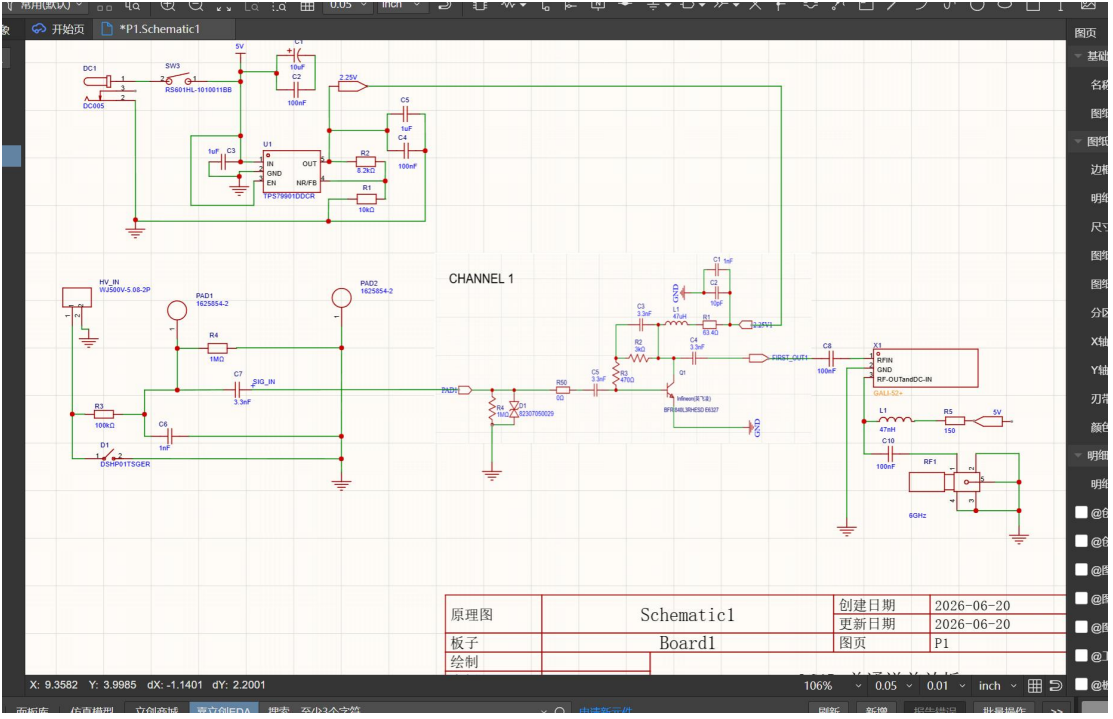


作业二、根据所给的一级放大电路，设计LGAD完整的单通道前放板原理图。LGAD信号上升沿约500ps，信号脉宽约2ns。要求：

- (1) 低压5V输入，电源可板上开关；
- (2) 提供LGAD所需直流高压接口（考虑滤波，高频、低频？）；
- (3) 提供二级放大，约10倍；
- (4) 参考器件：TPS79901DDCR、GALI-52+、DSHP01TSGER；
- (5) 注意实际的电容、电感并非理想；
- (6) 将画好的原理图导出成pdf提交，并说明设计思路，比如选用器件的理由、添加电阻/电容/电感的理由；
- (7) 不要求版图绘制，鼓励作为个人兴趣尝试

## 一、作业任务整体理解

课堂上提到 LGAD 输出信号上升沿 500ps、脉冲宽度 2ns，属于高速微弱电流脉冲，没法直接用示波器采集。整套电路的核心思路是先做电流转电压，再分两级放大，同时做好高压滤波、电源降噪。



## 一、三条主线

### 1、脉冲信号传输主线（LGAD 至示波器）

LGAD 的 PAD1 只能输出 nA 级微弱电流，无法直接放大，因此在最前端放置 1MΩ 电阻

作为无源跨阻，完成电流-电压转换。转换后的信号带有探测器高压直流分量，所以串联 3.3nF 隔直电容，只让交流脉冲通过，隔绝直流电位。

之后信号送入 BFR840L 构成的一级射频共射放大电路，完成第一次抬升，输出网络标记为 FIRST\_OUT1。两级放大中间增加 100nF 隔直电容，隔离两级放大的静态电压，再送入 GALI-52+ 二级放大芯片，实现十倍电压增益。最后信号经由 SMA 射频座输出，外接示波器观测波形。

！最开始我打算用 MMBT3904 三极管的简化电路，普通开关三极管高频损耗大，处理 2ns 脉冲会严重失真，于是按照题目原图换成专用射频管 BFR840L，重新调整了这部分线路。

## 2、整机 5V 供电主线

外部统一输入 DC5V，板载 SW3 船型开关控制整机通断，电源分成两条独立支路分开走线，避免放大电路互相引入噪声。

一条支路直接连通 GALI-52+ 射频芯片供电引脚；另一条送入 TPS79901 线性稳压芯片，稳压输出 2.25V 低噪声电源，专门供给一级射频三极管。射频放大对电源噪声十分敏感，开关电源纹波会淹没微弱脉冲，因此必须单独用 LDO 稳压，这也是我画图过程中慢慢意识到的关键点。

同时考虑到理想电容不存在，实际电容带有寄生电感，单一电容无法覆盖高低频噪声，在 5V 输入、LDO 输出位置都搭配了 10uF、100nF、1nF 三类电容并联，大电容滤低频波动，小电容抑制高频杂波，实现全频段去耦。

## 3、LGAD 高压偏置主线

LGAD 工作需要数百伏反向高压，高压线路容易引入静电、浪涌和各类噪声，轻则波形畸变，重则击穿探测器与后级放大元件。

外部高压从 HV\_IN 端子接入，先并联 DSHP01TSGER 高压 TVS 二极管对地，泄放瞬时过压、静电能量；再经过 100kΩ 电阻搭配 1nF 电容组成 RC 滤波，过滤高压线上叠加的高低频噪声；经过保护、滤波后的干净高压输送至 PAD1，给 LGAD 提供稳定反向偏置。

最开始画图只加了 RC 滤波，完全忽略高压防护，对照作业要求后，才补充上 TVS 防护支路。

# 二、元器件选用原因

## 1、DSHP01TSGER 高压 TVS 保护二极管

LGAD 需高压偏置，实验室静电、浪涌易击穿器件，该 TVS 可瞬时导通泄放过压，保护探测器与后级放大电路。

仅单级高压入口防护，未在信号端增设次级 ESD 防护，分级防护方案尚不熟悉。

## 2、TPS79901DDCR LDO 线性稳压器

用于 5V 转 2.25V 模拟电源。射频放大对噪声敏感，LDO 输出纹波远小于开关电源；通过 8.2kΩ、10kΩ 分压精准输出 2.25V 适配一级三极管；使能端常接 5V 持续工作，外围电路简单易绘制。

## 3、GALI-52+ 射频放大芯片

二级放大核心。带宽 DC~3GHz 适配 LGAD 纳秒脉冲，20dB 增益实现 10 倍放大，满足指标；集成度高、外围电路比较简单易懂；输出引脚交直流复用，搭配扼流圈即可分离供电与信号。

## 4.BFR840L 射频 NPN 三极管（一级共射）

选用原因：参考电路图指定射频专用管，截止频率高，2ns 窄脉冲无明显失真；共射拓扑兼具电流、电压增益，抬升跨阻转换后的微弱电压；发射极接地拓扑与示例电路完全一致，便于复刻。

## 5.电阻

R4=1MΩ: 实现 I-V 转换, 大阻值提升输出电压幅度, 便于后级识别微弱电流脉冲。

R2=3kΩ、R3=470Ω: 基极分压稳定静态工作点, 保证脉冲处于线性放大区, 避免波形削顶失真。

R1=63.4Ω: 配合电容组成 RC 滤波, 消除 2.25V 电源射频杂波。

R5=150Ω: GALI-52 + 供电限流, 抑制上电冲击电流, 保护芯片。

R50=0Ω 跳线: 简化布线, 隔绝前后级直流电位, 仅传输交流脉冲。

仅使用标准定值电阻, 未做 50Ω 阻抗匹配计算, 射频匹配理论掌握薄弱。

## 6.电容

3.3nF、100nF 隔直电容: 通交流隔直流, 隔离各级直流电位, 防止高压、偏置电压串扰损坏器件。

10uF/1uF/100nF/1nF/10pF 组合滤波: 大电容滤低频电源波动, 小电容吸收高频射频噪声; 考虑电容寄生电感的非理想特性, 多容并联覆盖全频段降噪。

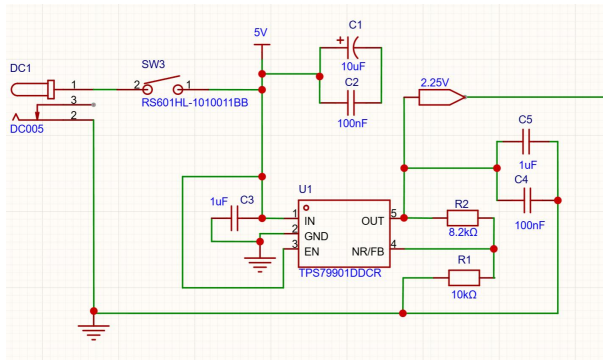
## 三、分模块电路功能说明

### 1、5V 低压输入与开关模块

由 DC005 电源插座、船型开关、输入滤波电容组成, 实现整机电源通断控制, 开关后端并联 10uF+100nF 电容滤除外部电源高低频干扰, 对应作业中的的低压输入、板载开关要求。

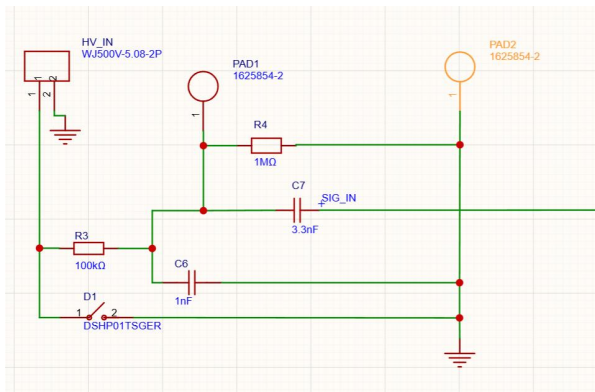
### 2、TPS79901 2.25V 稳压模块

完全对照芯片手册搭建输入滤波、分压反馈、多级输出滤波电路, 独立输出模拟电源供给一级射频放大, 模拟、供电线路分开, 降低噪声耦合。



### 3、LGAD 高压输入滤波防护模块

集成高压端子、DSHP01TVS 防护、RC 高低频滤波电路, 为探测器提供低噪声、安全的反向偏置高压, 满足作业高压接口、高低频滤波设计要求。

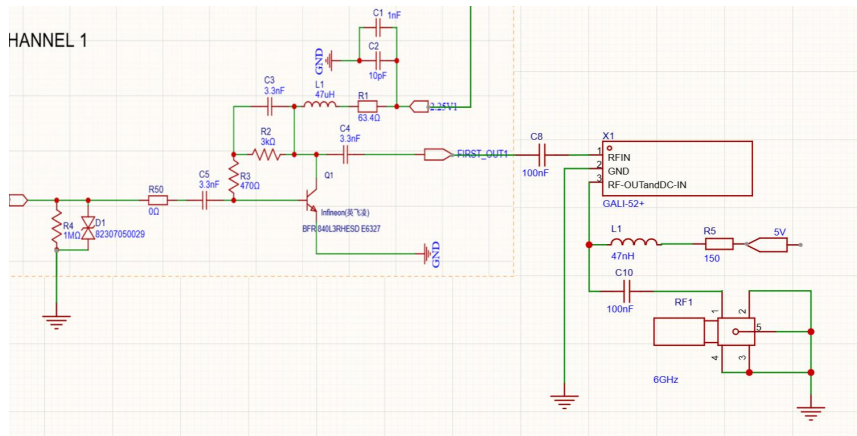


#### 4、BFR840L 一级射频共射放大模块

直接利用题目给出的 CHANNEL1 电路，包含输入 ESD 保护、基极分压偏置、47nH 射频扼流圈集电极负载、电源多级滤波、输入输出双隔直电容，完成第一次电压放大，输出 FIRST\_OUT1 送入后级。

#### 5、GALI-52+ 二级放大与 SMA 输出模块

完成十倍二次射频放大，复用引脚分路处理供电与输出信号，末端搭配标准 SMA 射频座，适配示波器采集脉冲，完成整机信号输出。



不足：

- 1、只在高压输入口加了一级 TVS 防护，没有在探测器信号线上再加一级 ESD 防护。虽然知道多级防护能更好降噪、分流浪涌，但我目前对这一部分的方法了解很少，这块设计思路掌握得很浅。
- 2、对于射频  $50\Omega$  阻抗匹配，我现在只会简单用隔直电容做交流耦合，没办法自己计算匹配电阻的数值，高速脉冲发生反射的相关知识也不理解。
- 4、目前只完成了原理图，PCB 相关布局完全不熟悉，不清楚射频走线长短、地层分割、SMA 接口摆放等相关问题。

一直对粒子探测的电子学部分感兴趣，但自身基础不足，不敢动手实操。这次作业时间紧张，只能边自学边画图，绘制、器件选型、电路逻辑梳理都花费了大量时间。中途多次出现元件参数选错、电路功能遗漏的问题，反复修改调整。

原本打算用简单三极管简化电路，后来主动对射频参数更换专用射频管，补齐高压防护、多级滤波结构，完整梳理出“高压偏置 - 电流电压转换 - 两级射频放大 - 示波器输出”整套信号链路。虽然很多射频深层理论暂时无法吃透，PCB 布局也完全不熟悉，但这次实操让我理清了 LGAD 前置放大电路基础设计逻辑，达到了本次作业的学习目标。

我一直对电子学等方面抱有兴趣，可惜没有学过模电、射频基础薄弱，之前不敢动手实操。本次作业我的准备时间不太充分，也没有全面的学习背景知识，整套电路只能依靠查阅相关资料询问 AI 等方法一步步摸索绘制，元器件参数搭配、信号链路逻辑都花费不少时间打磨，画图期间也出现过元件选型出错，原理图绘制不理解等问题。

最开始为降低难度打算采用普通三极管搭建放大电路，对比高频性能参数后意识到方案不适配高速脉冲，于是更换专用射频三极管，补充高压防护与分段滤波部分。现在，关于射频相关深层原理我还不理解，PCB 布局布线也尚未接触，但这次完整的实操让我对 LGAD 前置放大电路的设计有了一个大体思路，也算顺利完成本次作业的学习任务。

知识点整理

## 一、什么是电子学

### 1. 核心定义

课件给出了两个角度的定义：

通俗理解：发明器件、设计电路来“驾驭”电子，利用电子的物理性质和运动规律为人类工作。

学术定义：用电信号承载信息，并完成处理、传输、存储的科学，是连接物理世界和数字世界的桥梁。

### 2. 三大分支（对应课件「三大分支」条目）

电子学分为三个核心方向：

电磁场与波：基于麦克斯韦方程组，让信号以电磁波形式传输，比如 5G 天线、射频电路、高速数据线，核心是“让信号飞起来”。

信号处理：对电信号进行放大、滤波、提取，最终转换成计算机能识别的数字信号。这是粒

子物理实验电子学的核心，也是你本次作业的相关内容。

电力电子：控制电能的形式，比如电压转换、电机驱动，核心是能量的变换与传输，比如手机快充、电源管理芯片。

## 二、信号处理

讲粒子探测的信号如何从“粒子”变成“电脑能读的数据”，课件分了 3 个阶段。

### 1. 简单系统：基础信号链路

最基础的粒子读出链路是：

带电粒子 → 传感器 → 放大器 → ADC（模数转换器） → 电脑/示波器

各个环节详细解释

传感器（LGAD）：带电粒子穿过硅探测器时，会电离产生电子-空穴对，形成一个微弱的模拟电流脉冲。这个信号通常只有毫伏甚至微伏级别，上升沿 500ps、脉宽 2ns，幅度小、速度极快。

放大器：把微弱的脉冲信号放大几十上百倍，否则信号太小，后面的电路无法识别。“前置板”，就是放在最前面的前置放大电路板。

ADC（模数转换器）：把连续变化的模拟电压，转换成离散的 0 和 1 数字信号，这样电脑才能读取、存储、分析。“示波器内含 ADC”，就是这个原理——示波器测波形本质是用高速 ADC 对信号采样。

简单系统的缺点：通道数量有限、读写速度慢，只能单向从 PCB 传数据给电脑，电脑不能反向控制 PCB，只适合单通道简单测试。

2.进阶方案：加入 FPGA 在 ADC 之后加入 FPGA（现场可编程门阵列），解决简单系统的缺陷。

FPGA 的核心作用：① 把 ADC 输出的数字数据按固定格式打包，通过 USB 等接口传给电脑；② 接收电脑的指令，反向控制 PCB 上的电路（比如调节放大器增益、开关高压电源）。

课件里的类比：

普通 CPU / 商用芯片：内部硬件连线是工厂固定的，像已经建好的房子，功能固定，只能使用不能修改结构。

FPGA：像一堆造房子的原材料（逻辑门、可编程连线），你可以用 Verilog 硬件描述语言写代码，重新配置芯片内部的物理连线，实现任意自定义的数字逻辑，灵活性极强。

### 3.通用方案

把传感器、放大器、ADC、FPGA 全部集成在同一块 PCB 上，形成完整的读出系统，是粒子物理实验的主流方案。课件里的 Xilinx Kintex FMC 开发板，就是常用的原型验证 FPGA 板卡。

## 三、板级设计

### 1.PCB 的定义与类比

PCB 是承载电子元器件、实现电气连接的载体。

绝缘基板：城市的地基，给所有元件提供物理支撑。

走线（铜箔）：城市的公路，电流和信号沿着铜箔走线传输。

过孔（Vias）：连接不同板层的“电梯”，复杂 PCB 是多层结构，表层和内层的走线需要过孔连通。

阻焊绿油：城市的绿化带，覆盖在铜箔上做绝缘，防止不该相连的地方短路，只有焊盘位置露出来用来焊接元件。

丝印（白色文字）：路牌和门牌号，比如图上的 R23、C31，是元件的编号，方便焊接和调试。

### 2.PCB 的分层结构

PCB 不是单层薄板，是多层材料压合而成的。课件举了 4 层板的例子：

芯板（Core）：中间的承重绝缘板，上下两面都覆盖铜箔金属层，是板子的核心骨架。

半固化层（PP，胶水）：加热后会固化，用来把不同的芯板、铜箔层粘合在一起。

阻焊层：最外层的绿色绝缘保护层。

简单电路用 2 层板（顶层 + 底层走线）即可，高速、复杂电路会用 4 层、8 层甚至更多，中间层专门走电源和地，减少信号干扰。

### 3. 三类过孔

通孔：从顶层直接钻到底层，贯穿整个板子，成本最低、最常用。

盲孔：只从表层钻到中间某一层，不钻穿整个板子。

埋孔：只在板子内部两层之间连通，从外部完全看不到。

后两种成本高，仅用于高密度、高速的复杂板子，你的作业用通孔即可。

### 4. FPGA 厂商与开发流程

AMD（原 Xilinx）市场霸主，生态最完善，资料最多

Intel（原 Altera）第二，侧重数据中心

Kintex 就是 Xilinx 的中端系列

#### \*FPGA 开发 6 步流程

设计输入：编写 Verilog/VHDL 代码，或调用现成 IP 核

行为级仿真：在软件里验证逻辑功能是否正确，无需硬件

逻辑综合：把代码转换成底层逻辑门、触发器的连接网表

布局布线：把逻辑门映射到 FPGA 芯片的物理位置，并完成连线

时序分析：检查信号传输延迟是否满足目标频率要求

比特流与调试：生成二进制文件，下载到 FPGA 中实测调试

### 四、集成电路设计

#### 1. 为什么要自研芯片？

用商用芯片的通用方案有两个核心痛点：

性能不足：粒子物理实验对信号速度、精度、动态范围、功耗、面积的要求极高，商用通用芯片无法满足。

渠道受限：高端芯片可能存在禁运、断供问题，自主可控性差。

因此高能物理领域会自研专用集成电路（ASIC）。

#### 2. 集成电路产业链

产业链分为三大核心环节：IC 设计 → IC 制造 → 封装测试

上游支撑产业包括：EDA 设计软件、IP 核、半导体设备、半导体材料（硅片、光刻胶、靶材等）。

国内产业现状：封测领域实力较强，材料部分领域追平国际，但高端芯片设计、核心设备、高端材料仍有较大差距，制造环节台积电占据全球 60% 左右份额。

#### 3. 芯片封装的 4 个步骤

晶圆（Wafer）：一整片圆形硅片，上面同时制作几千颗相同的芯片。

裸片（Die）：用激光把晶圆切割成一颗颗独立的小芯片，非常脆弱，无法直接使用。

金线键合：用比头发还细的金线，把裸片上肉眼不可见的微小触点，连接到封装的引脚上。

注塑封装：用环氧树脂把裸片密封起来，形成我们日常看到的标准芯片。

封装的三个核心作用：

- ① 物理保护：防摔、防尘、防潮，避免短路损坏；
- ② 扩展引脚：把裸片的微型触点，扩展成可焊接在 PCB 上的大引脚；
- ③ 传导散热：把芯片工作产生的热量快速导出，防止烧毁。

#### 4. 模拟 IC 与数字 IC

模拟 IC: 处理连续的模拟信号, 比如放大器、ADC、滤波器。基于晶体管级设计, 难度高、灵活性强, 核心关注噪声、增益、线性度、功耗等指标。放大电路就属于模拟电路范畴。

数字 IC: 处理 0 和 1 的数字信号, 用于计算、逻辑控制。自动化程度高, 易大规模集成, 核心关注时序、面积优化。

#### 5. IC 设计流程

模拟 IC: 系统设计 → 原理图绘制 → 前仿真 → 布局布线 → 后仿真 → 流片

数字 IC: 系统设计 → RTL 编码 → 前仿真 → 逻辑综合 → 布局布线 → 后仿真 → 流片

前仿真是理想条件下的功能仿真, 后仿真会加入布线带来的真实延迟, 更接近实际芯片表现。流片就是把设计好的版图送去晶圆厂生产, 成本极高, 因此流片前会反复仿真验证。

#### 五、团队工作

LGAD 是低增益雪崩二极管, 一种高性能硅粒子探测器, 时间分辨率极高, 用于精确测量带电粒子的到达时间。

自研了专用读出芯片 LATRIC (集成放大器 + 时间数字转换器 TDC), 从单通道迭代到 8 通道。

配套设计 PCB 验证板, 使用的工具就是嘉立创 EDA 专业版