

等离子体扬声器制作报告

2026 年春季学期, 设计与制作等离子体扬声器

1. 实验内容

等离子体扬声器以气体放电作为换能器, 将电信号直接转换为声压波[1]. 与传统扬声器不同, 它没有机械振膜, 声音主要来自放电通道附近空气的快速加热与膨胀.

常见的等离子体扬声器形式包括射频电晕放电, 直流电晕放电和直流辉光放电[2].

2. 模型

等离子体扬声器中的声场可以看作中性理想气体中的普通压力波, 其驱动来自放电引入的源项. Bastien 的表述强调了两类一般性的声源结构: 热源项和力源项[3]. 对于直流辉光等离子体扬声器, 起主导作用的通常是热效应: 电流调制改变放电柱温度, 温度调制再通过理想气体状态关系转化为压强调制.

3. 电路设计

KiCAD 的 Tools > Plugin and Content Manager 可以下载到 Fabrication Toolkit. 支持导出嘉立创 BOM.

按照功能, 电路可以分成两部分, 音频放大以及 ZVS 驱动.

3.1. 音频放大

参考[反相放大器电路 \(Rev. B\)](#), 但根据本实验需要做了单电源化和声道合成处理.

J1 的左右声道先经电容耦合进入 TL072 的其中一路通道, 另一个通道被禁用. 两个 $22\text{ k}\Omega$ 电阻用于声道求和和输入阻抗设定. 围绕运放的 $22\text{ k}\Omega$ 电阻和 $22\text{ k}\Omega$ 可调电阻用于设置 AMP_OUT 的放大幅度. 这一部分的目的是合成与放大音频.

3.2. ZVS 驱动

我参考了 [How to Build a Simple But Powerful Flyback Driver](#) 所示的 Mazzilli ZVS 思路, 由两只 IRFP4668PbF MOSFET 组成对称自激结构. 输入电感 L1 向高压包一次侧中心抽头供能, 两个功率管交替导通, 在一次侧和谐振电容 C4 之间形成高频谐振回路. C4 与 C6 取值为 $0.33\text{ }\mu\text{F}$, 用于维持 ZVS 所需的谐振条件.

AMP_OUT 并不直接参与高频自激, 而是作为低频调制信号去改变放电功率.

3.3. 原理图

板承载低压控制与一次侧驱动部分, 高压包通过外部连线接入.

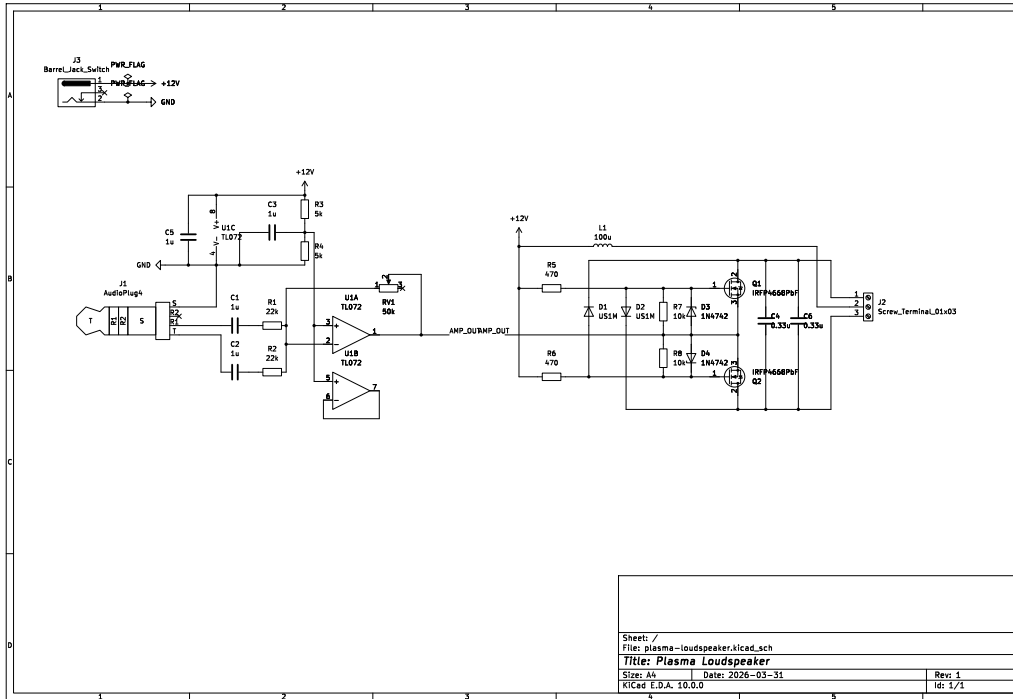


图 1 原理图

3.4. PCB

PCB 采用双层板, 在音频放大部分采用双面覆铜作为 GND. 最大线宽为 0.5 mm, 最小线宽为 0.15 mm.

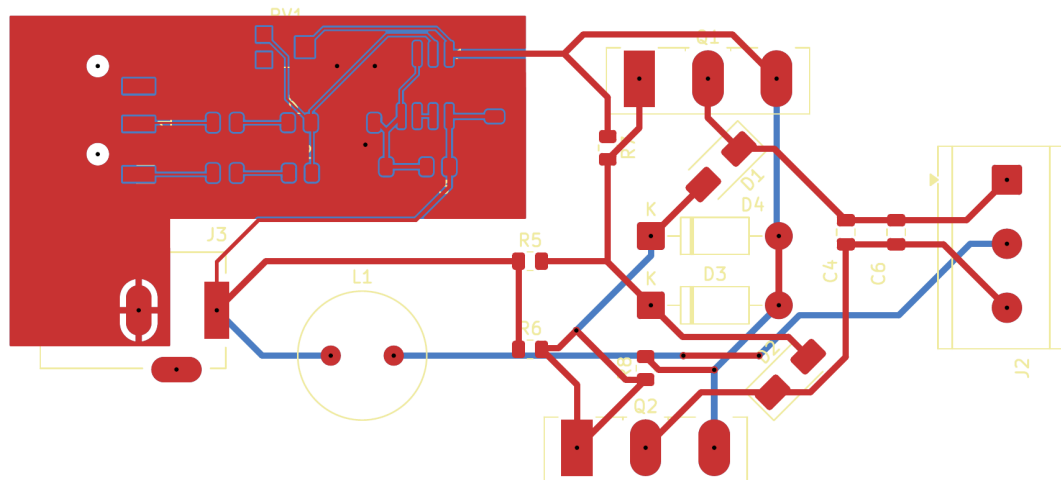


图 2 PCB

3.5. 物料小计

商品名称	商品编号	品牌	商品类型	封装格式	型号发 货数量	单价 (人 民币含 税)	小计金 额 (人民 币含税)
10kΩ ±1% 125mW 厚膜电 阻编带	C17414	UNI-ROYAL(硕 声)	贴片电 阻	0805	100	0.0123	1.23
DC 电源 插座内径:2.5mm 外径:6.3mm 袋装	C111573	SOFNG(硕 方)	DC 电源 连接器	插件	1	0.98	0.98
22kΩ ±1% 125mW 厚膜电 阻编带	C17560	UNI-ROYAL(硕 声)	贴片电 阻	0805	100	0.0113	1.13

商品名称	商品编号	品牌	商品类型	封装格式	型号发货数量	单价(人民币含税)	小计金额(人民币含税)
470Ω ±1% 125mW 厚膜电阻编带	C17710UN	UNI-ROYAL(厚声)	贴片电阻	0805	100	0.0116	1.16
330nF ±10% 50V 编带	C73142 S	SAMSUNG(三星)	贴片电容 (MLCC)	0805	50	0.0778	3.89
耐压:1kV 电流:1A 反向恢复时间: 75ns 编带	C412437	MDD(辰达半导体)	快恢复/高效率 二极管	SMA	50	0.059	2.95
1x3P 5.08mm 直插排数:1 每排 P数:3 袋装	C395869 D	DORABO(地博电气)	螺钉式 接线端子	插件,P=5.08mm	5	1.456	7.28
3.5mm耳 机座 编带	C431535	SHOUHAN(首韩)	音频连接器(耳机)	SMD	10	0.254	2.54
50kΩ ±25% 编带	C913246	BOURNS	可调SMD 阻/电位器	SMD-3P,3.8x3.6mm	5	0.592	2.96
薄膜电阻 5kΩ ±0.1% 200mW 编带	C2073749	VISHAY(威世)	贴片电阻	0805	2	6.795	13.59

商品名称	商品编号	品牌	商品类型	封装格式	型号发货数量	单价(人民币含税)	小计金额(人民币含税)
1 个 N 沟道 耐压 :200V 电流 :130A 管装	C2921	Infineon(英飞凌)	场效应管(MOSFET)	TO-247AC	4	10.23	40.92
100uH ±10% 2.2A 工字电感 袋装	C5119631	PROD(谱罗德)	色环/插件电感	插件,D10xL19mm	5	1.616	8.08
通用 J-FET 输入 双运算放大器 编带	C5157710	Gcore(扬州国芯)	运算放大器	SOP-8	5	0.858	4.29
1uF ±10% 50V 编带	C28323	SAMSUNG(三星)	贴片电容 (MLCC)	0805	20	0.068	1.36
独立式 耐压:12V 电流 :5uA 编带	C5174492	LGE(鲁光)	稳压二极管	DO-41	10	0.342	3.42

表 1 元器件物料清单

3.6. 下次迭代计划

- 添加开关
- 在 PCB 上安装风扇以及散热器
- 添加 LED 指示工作状态
- 进行立体声合成

4. 工期安排

时间	任务	完成状况
D-3	下订单购买元件, 定制 PCB	是
D-3	提交初期报告	是
D-2	制作电极, 缠绕高压包初级线圈	否
D+1	收到 PCB	是
D+1	进行焊接	否
D+4	进行焊接	是
D+4	测试	是
D+6	总结经验和改进, 绘制下一版原理图与 PCB	否
D+7	迭代下一版 PCB	否
D+14	撰写中期报告	是

表 2 工期计划 (学期第六周周日 23:59 为 D0)

4.1. 测试计划

1. 接入 12V 供电, 利用示波器观察放大输出波形是否正确
2. 接入高压包, 观察是否能产生电弧, 以及是否持续
3. 移动电极距离, 再次观察
4. 评价音质

在 D+4 的测试, 发现放大输出部分是正确的. 而 ZVS 不能正常工作.

不足

- 没有留出通孔来插电极, 用示波器或万用表的调试体验很不好
- 也没有做开关, 难以独立调试电路的某一部分
- DC 电源, 3.5mm 音频接口靠近电路板内侧
- 没有完成机械加工和支撑
- 手工焊接质量差

分析

ZVS 常见的接法是连接电源输出与电极地, 而我这里是接入了电源输出以及 AMP_OUT.

TL072 是小信号运放, 不是功率级回流路径. ZVS 谐振电流很大, 不能让运放输出脚承担这个节点. 这样的接法破坏了 MOSFET 的 V_{GS} 条件.

改进

必须更换调制方式.

5. 后期改进

在改电路的过程中, 我让 OpenAI codex 也加入进来. 得益于 KiCAD 以纯文本作为项目文件的存储方案, 以及超级厉害的 [kicad-happy](#), codex 比较方便地读取了我的项目, 并且修掉了我一直尝试解决, 但是不会做的模拟问题: 它手搓了网表中不正确的 pin 脚, 帮我第一次运行了正经的模拟, 在模拟中, 复现了之前的 ZVS 不起振的观察.

5.1. 下一版设计

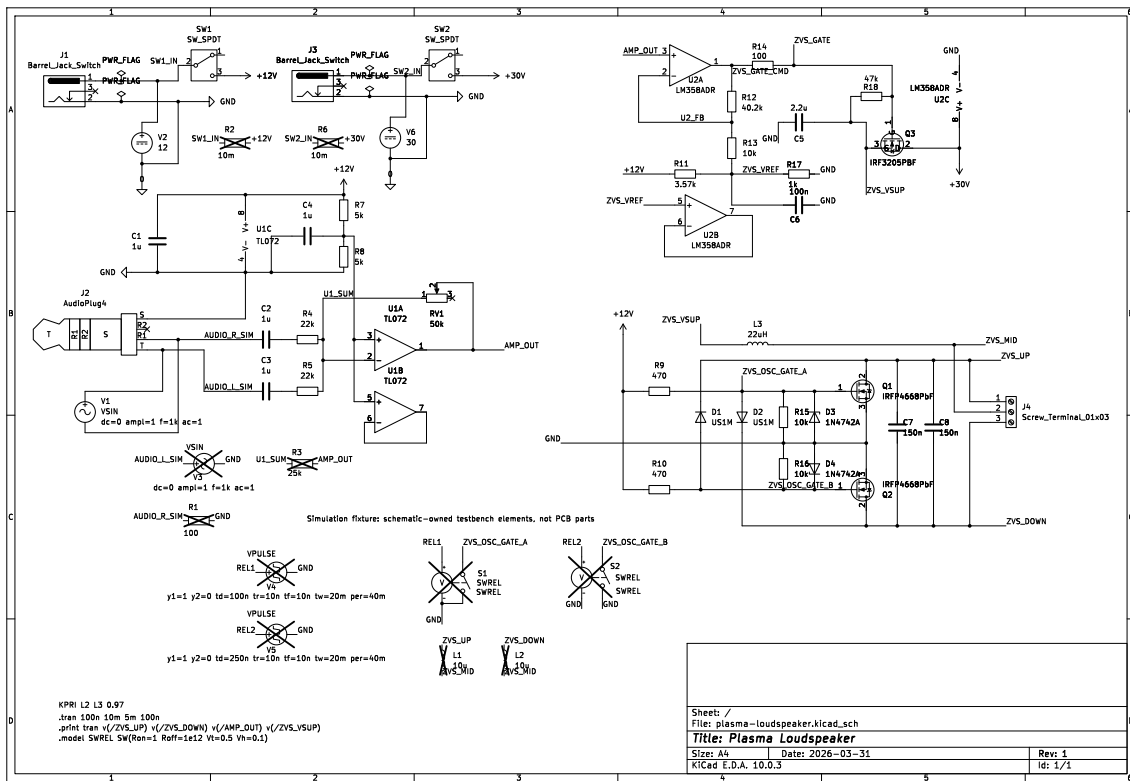


图 3 下一版原理图

下一版里, ZVS 不再直接接入音频放大器的输出. 音频输入先经过 LM358, 再推动一个 IRF3205 作为供电调制管, 生成 ZVS_VSUP. 这个电压通过 22 μ H 电感喂给 flyback 初级的中心抽头. 两个 IRFP4668 仍然组成自激 ZVS, 初级两端接在 ZVS_UP 和 ZVS_DOWN, 中心抽头接 ZVS_MID.

这样分开之后, 12V 只负责运放和控制部分, 30V 才是 ZVS 的功率输入. 电路上保留了两个开关, 方便调试时先开控制电源, 再开功率电源. LM358 的另一个运放单元没有使用, 因此接成跟随器固定在参考电压上, 避免输入脚悬空.

谐振电容改成两颗 150 nF 薄膜电容并在 ZVS 两端, 总电容是 300 nF. 这个值比 100 nF 更偏向较低的载波, 也让低频音频包络更容易保留下来.

5.2. 模拟

我把上面的结构放进 KiCAD 的 SPICE 模型里跑时域模拟. 模拟里音频输入是 1 kHz 正弦波, flyback 初级用两个耦合电感近似, 中心抽头由 ZVS_VSUP 供电. 这不是高压包的完整模型, 但足够看 ZVS 是否起振, 以及音频包络有没有传到初级.

在 30 V 功率输入下, AMP_OUT 大约是 2.27 V, 中心抽头供电 ZVS_VSUP 在 6.7 V 到 17.2 V 之间变化. ZVS 初级两端的差分电压约为 131 V, 载波频率约为 322 kHz. 因此模拟中看到是: 高频 ZVS 载波自己振荡, 低频音频通过中心抽头供电去调制它的包络.

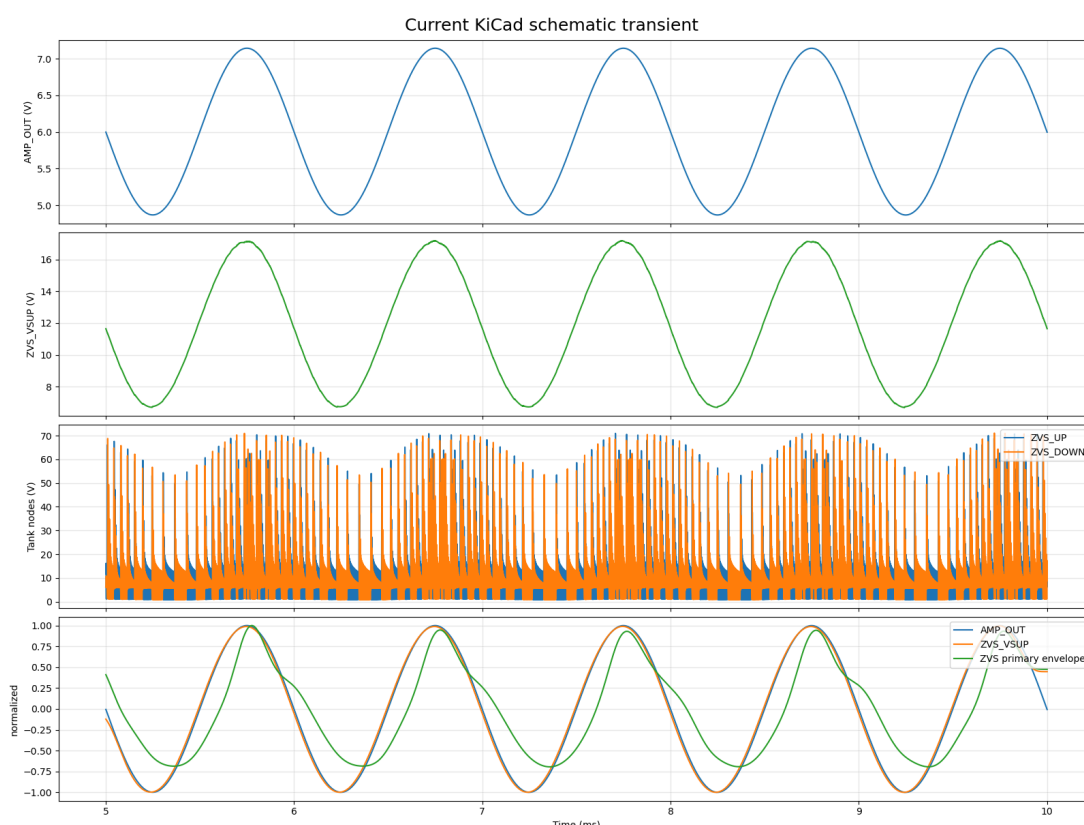


图 4 仿真结果

扫频时, 以 1 kHz 为参考, 初级包络在 2 kHz 大约衰减 4.1 dB, 到 5 kHz 衰减约 13.3 dB, 到 20 kHz 衰减约 31.4 dB. 这说明它不是一个平坦的全音频带宽放大器, 但如果目标主要是 2 kHz 以下的人耳敏感频段, 这个调制能力是可以接受的.

6. 测试结果

不过, 测试结果还是不能起振. 我经过一天的调试, 除了发现 TL072 运放烧毁, 更换它后, 没有发现其他的问题, 只能发现 ZVS 没有能量输入, 原因不清楚.



图 5 进行测试

7. 其他

感谢 Ayu 教学我使用 KiCAD 绘制原理图, 选择合适的封装, 以及用 KiCAD 绘制 PCB 布线, 教给我关于立创商场的若干技巧. 感谢 ldx 提醒我注意散热. 感谢 ajax 帮我调整了部分原理图的布局. 感谢王心诣和叶力玮帮我调试焊接电路板.

Bibliography

- [1] “Corona and Arc Discharge.” [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=2pLJ2ZX4By4>
- [2] M. S. Mazzola and G. M. Molen, “Modeling of a dc glow plasma loudspeaker,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1987, doi: [10.1121/1.394762](https://doi.org/10.1121/1.394762).
- [3] F. Bastien, “Acoustics and gas discharges: applications to loudspeakers,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1987, doi: [10.1088/0022-3727/20/12/001](https://doi.org/10.1088/0022-3727/20/12/001).