

实验三 逻辑门的功耗优化及 EDP 优化

23342107 徐睿琳

一、实验要求

了解动态功耗的影响因素，掌握 CMOS 逻辑门的动态功耗优化。

二、实验目的

- 1、了解 NAND 门的搭建方法；
- 2、了解延迟的定义及计算方法；
- 3、掌握如何得到最小延时

三、实验内容

- 1、针对指定逻辑门，通过仿真波形或电路图分析，写出其逻辑表达式，并计算其在 100ns 内的能耗；
- 2、设计并实现与实验 A) 中逻辑功能相同的电路，命名为 lab3_mycell，要求其能耗-延时积（EDP）小于实验 A) 中的逻辑门。输入信号的占空比分别为：A: 0.7, B: 0.5, C: 0.2, D: 0.1。

四、实验步骤

4.1 lab3_a 逻辑分析与能耗计算

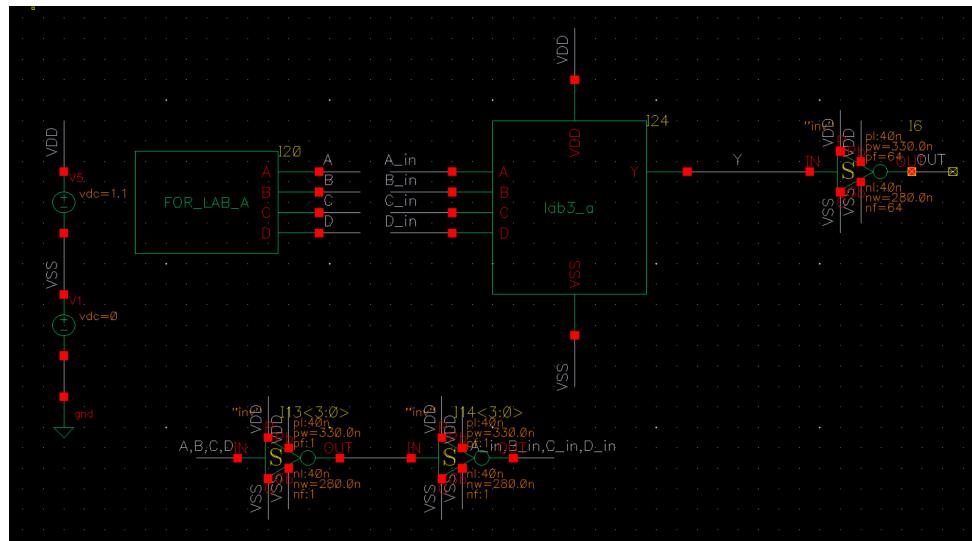


图 1: lab3_a 测试电路图

首先，结合 lab3_a 的测试电路图与仿真波形，分析输入信号 A、B、C、D 的连接方式及其对输出 Y 的影响。通过观察 100ns 内各输入组合对应的输出变化，归纳输出 Y 的逻辑表达式。最后，统计 100ns 内的能耗数据，为后续电路优化和 EDP 比较提供依据。

4.2 lab3_mycell 设计与功耗综合优化

在设计初期，我们对基准电路 lab3_a（基于 4 输入或 8 输入 NAND 门直连反相器）的局限性进行分析：

lab3_a 电路设计分析

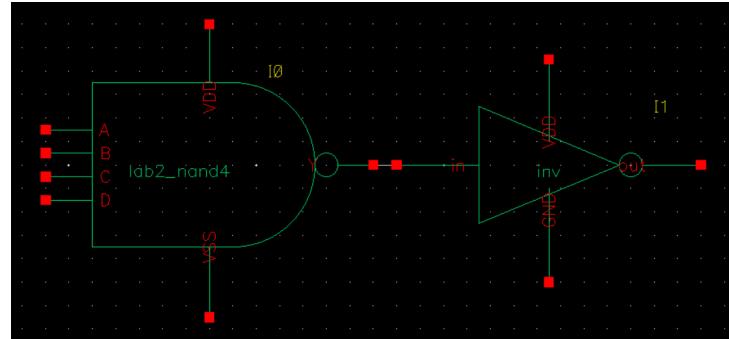


图 2: lab3_a 电路图

大扇入 NAND 门存在严重的堆叠效应，为平衡 N 管串联带来的导通电阻，必须将 NMOS 尺寸放大 N 倍。

EDP 瓶颈:

- **延时 (D):** 串联管导致巨大的寄生延时 ($P \propto N$)，导致本征速度极慢。
- **能耗 (E):** 为了补偿速度而被迫增大的晶体管尺寸，带来了巨大的栅极电容和扩散电容，导致动态功耗激增。

为了找到能耗延时积最小的结构，我尝试了三种替代 lab3_a 逻辑实现方式：

并行树形结构 (lab3_mycell_01)

设计思路：利用 De Morgan 定律，我将 AND4 分解为两级逻辑：NAND2 // NAND2 -> NOR2，将关键路径上晶体管的最大堆叠高度从 4 管串联降低至 2 管串联。

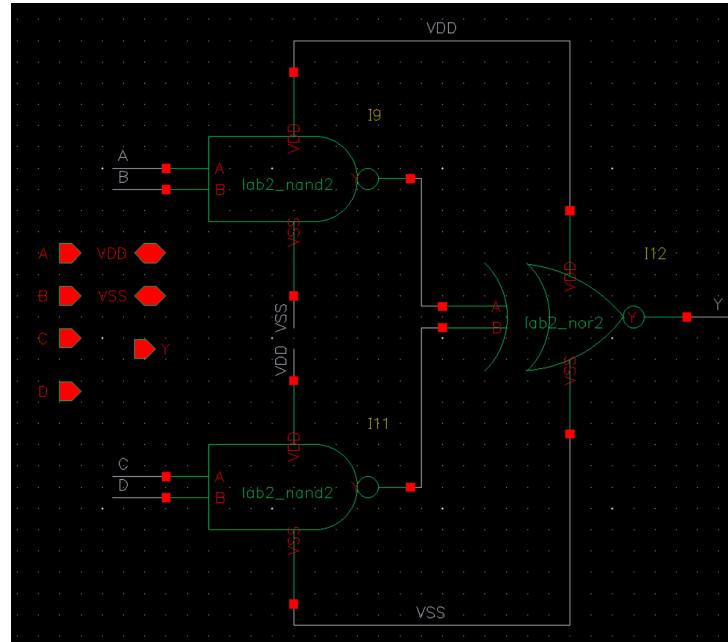


图 3: lab3_mycell_01 电路图

降低能耗延时积 (EDP) 的首要手段是降低寄生参数，而非盲目增大驱动。

- 1、打断串联链:** 利用 De Morgan 定律将 4 管串联 (或 8 管串联) 分解为多级逻辑。优势在于 mycell_01 中最大的串联数仅为 2 (NAND2 或 NOR2)，相比于基准电路，其寄生延时 (P) 减半。
- 2、降低无效电容 (Reducing C):** 由于串联数减少，NAND2 的 NMOS 只需放大 2 倍即可平衡电阻。意味着更小的栅电容和内部节点电容。直接降低了每一次翻转所需的电荷量 (Q)，从而降低能耗 (E)。

参数扫描设计 由于工艺最小宽度为 120 nm，故参数 a 的理论下限为 $120/330 = 0.36$ (此处取 0.4)，参数 o 的理论下限为 $120/280 = 0.43$ (此处取 0.5)。

对 a 与 o 进行粗略参数扫描，共设 36 个取样点：

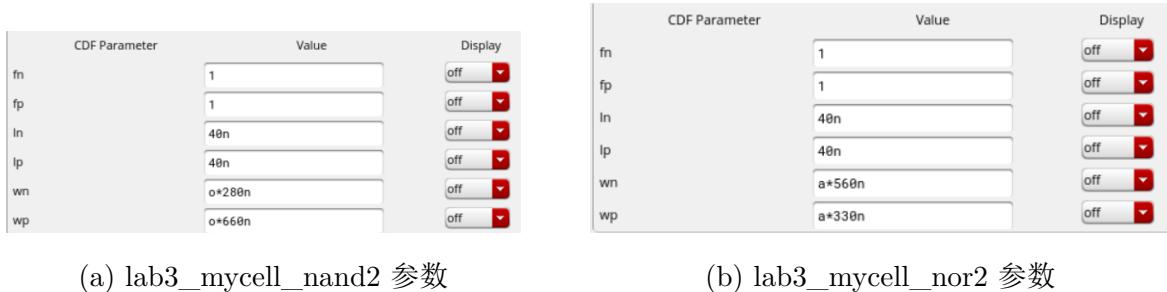


图 4: 参数扫描设计

Variable	Value	Sweep?	Range Type	From	To	Step Mode	Total Steps	Inclusion List	Exclusion List
a	1	<input checked="" type="checkbox"/>	From/To	0.4	10	Auto	6		
o	1	<input checked="" type="checkbox"/>	From/To	0.5	10	Auto	6		

图 5: 36 步参数扫描设置

驱动能力权衡，引入链式结构 (lab3_mycell_02)

在仿真 mycell01 后，我发现树形结构虽然本征性能优异，但在驱动 64 倍大负载时显得力不从心。最后一级 NOR2 需要做得非常大才能推动负载，这导致了前级驱动后级的困难。因此，我尝试了 lab3_mycell_02（链式结构）。思考：通过增加级数（流水线深度），利用反相器极强的驱动能力 ($g = 1$) 来承担“搬运电荷”的重任，试图缓解大负载下的延时问题。局限：虽然驱动力改善了，但级数过多增加了总的开关活动率，可能导致能耗回升。

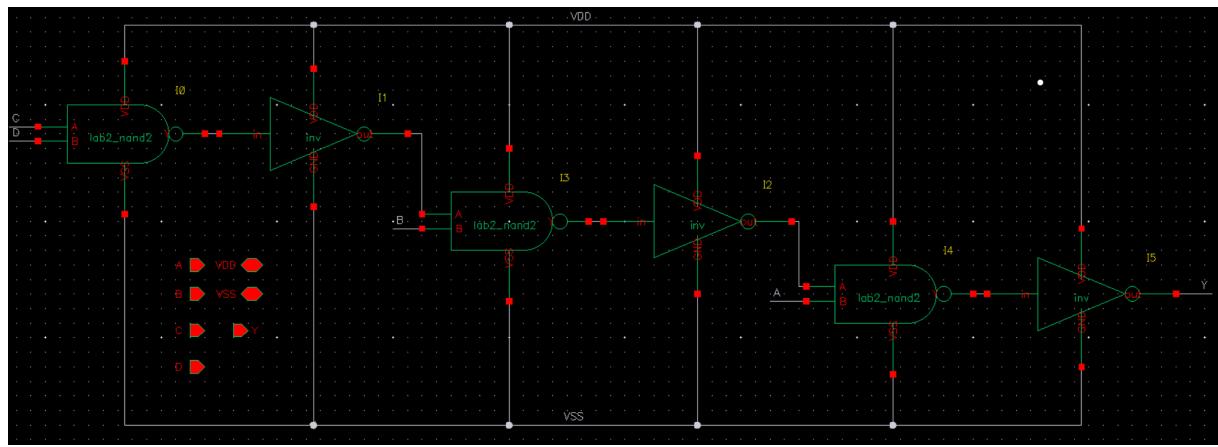


图 6: lab3_mycell_02 电路图

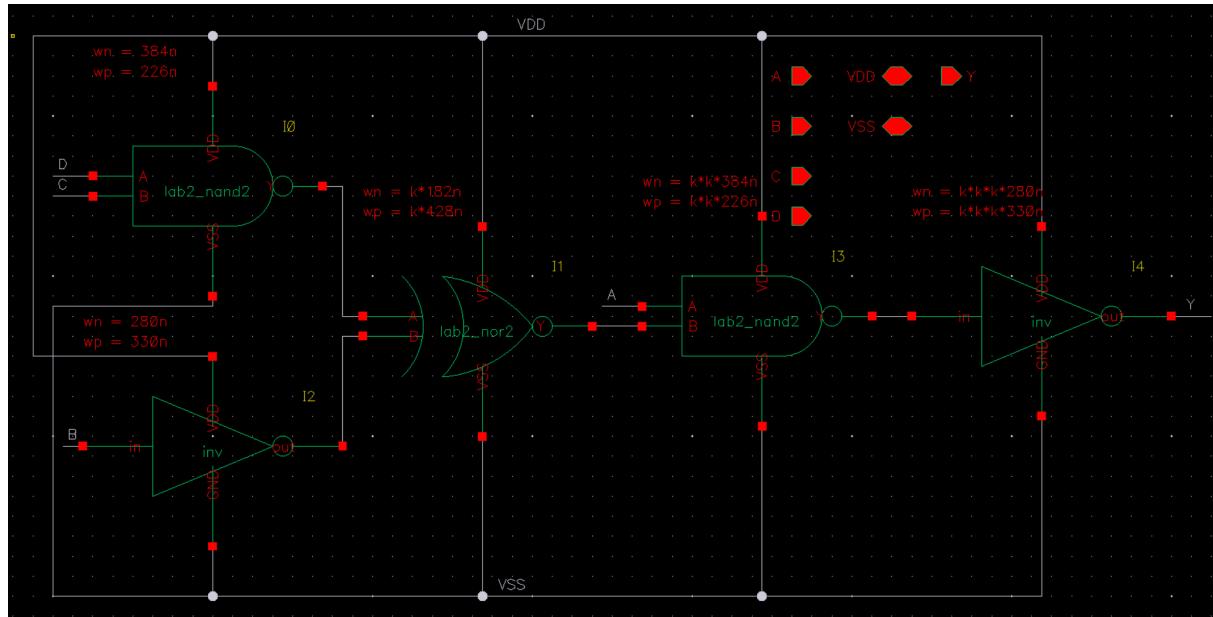
lab3_mycell_03 电路设计 (基于 lab3_b 实现)

图 7: lab3_mycell_03 电路图

五、实验结果

5.1 lab3_a 逻辑分析与能耗计算

0.0.1 逻辑分析

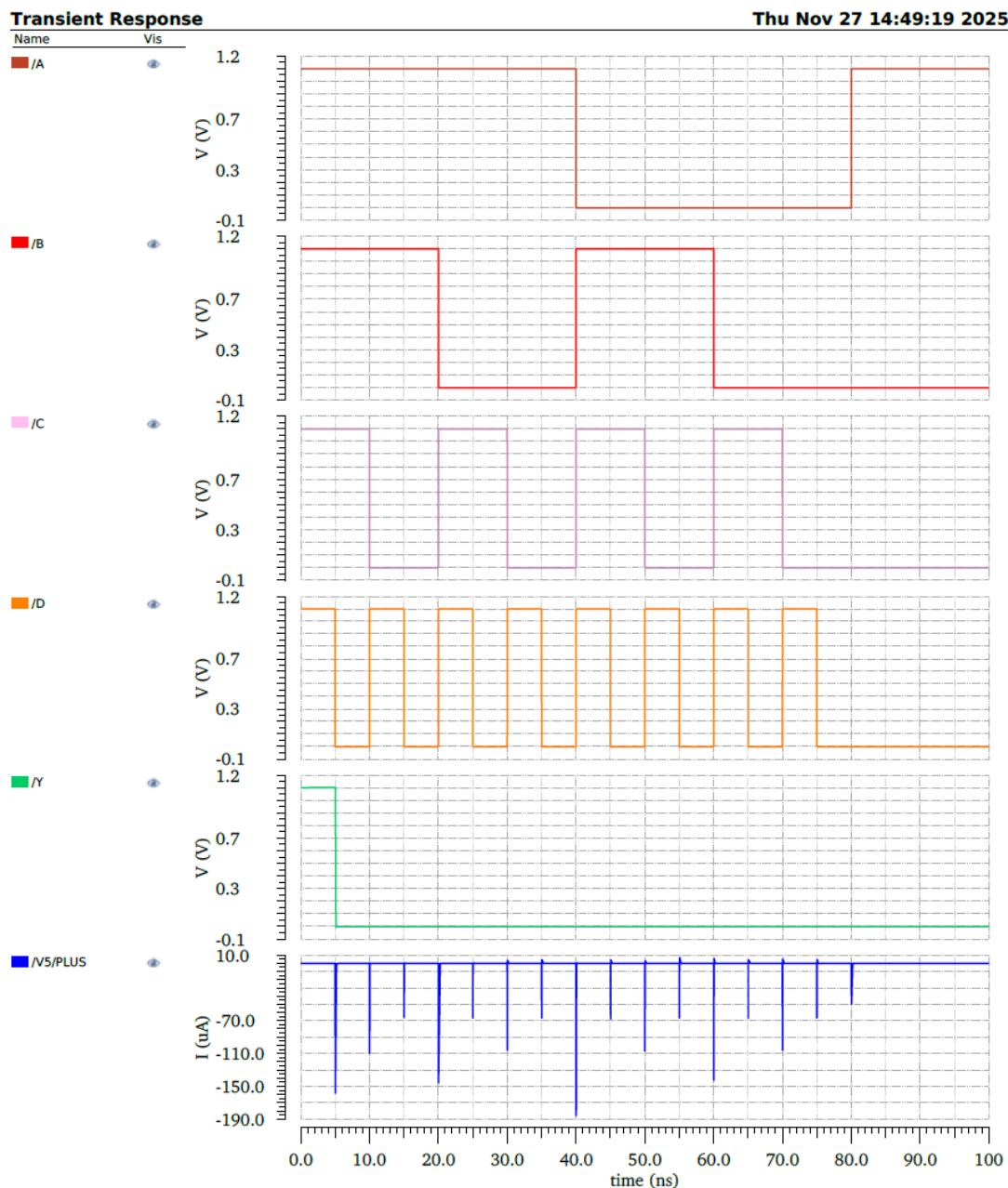


图 8: lab3_a 100ns 内仿真波形图

如图8所示，通过观察波形图可知，输出 Y 的逻辑表达式为：

$$Y = A \cdot B \cdot C \cdot D$$

即 lab3_a 是一个四输入与门。

0.0.2 能耗计算

根据 `(abs(integ(i("/V5/PLUS" ?result "tran") 0 1e-07)) * 1.1)` 计算，在 100ns 内，lab3_a 的能耗为：

Name/Signal/Expr	Value	Plot	Save	Save Options
0 A_Delay		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
9 C_Delay		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
10 D_Delay		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
11 Average_Delay		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
12 Energy	64.67f	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
13 Energy_Delay_Product		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

图 9: lab3_a 100ns 内能耗计算结果

六、总结

附录

附录 A 相关代码

附录 B 数据表格

附录 C 其他材料