第十课：功耗、能量

Thursday, October 10, 2019 1:45 PM

1. 能耗的来源：
   a. 动态功耗；
      i. 电容充放电；
      ii. 开关过程中电源和地线路径形成的短路电流；
   b. 静态功耗；
      i. 反偏二极管漏电流；
      ii. 亚阈值电流；
2. 动态功耗：
   a. 电容从电源取得的能量（假设输入信号上升沿/下降沿时间为零）；

      $E_{VDD} = \int_0^\infty i_{DD}(t)V_{DD}dt = C_L V_{DD}^2$

      $E_c = \frac{C_L V_{DD}^2}{2}$

      i. 电源提供的能量只有一半存放在C_L上，其他消耗在PMOS上；
      ii. 无论充放电，均与晶体管尺寸无关；
      iii. 考虑器件开关频率：

      $Power = \frac{Energy}{Transition} \cdot f = C_L V_{DD}^2 \cdot f_{0\to1}$

      iv. 开关活性对能耗的影响：$E_N = C_L V_{DD}^2 n(N), n(N)$表示N个时钟周期内$0 \to 1$的反转次数；
      v. 平均动态功耗：

      $P_{avg} = \alpha_{0\to1} C_L V_{DD}^2 f_{clk}$；

      vi. 改变晶体管的尺寸以降低功耗；
         1) 最优尺寸系数(性能约束)：$f = \sqrt{F}$；
            a) 进一步加大器件尺寸只会增加自载系数而降低性能；
            b) 提示允许降低V_{DD}；
         2) 考虑能量时的最优尺寸系数f小于考虑性能时的最优尺寸系数；
   b. 直流通路电流引起的功耗：
      i. 输入信号不为无穷大的斜率造成了开关过程中电源与地之间在短期内出现一条直流通路(即NMOS和PMOS同时导通)；
      ii. 短路电流能耗：

      $E_{dp} = t_{sc} V_{DD} I_{peak}$

      平均功耗：$P_{dp} = t_{sc} V_{DD} I_{peak} f = C_{sc} V_{DD}^2 f, t_{sc} I_{peak} = C_{sc} V_{DD}$

      I_{peak}由器件的饱和电流决定，正比于晶体管的尺寸；

      对直线输入斜率：$t_{sc} = \frac{V_{DD}-2V_T}{V_{DD}} t_s \approx \frac{V_{DD}-2V_T}{V_{DD}} \times \frac{t_r(f)}{0.8}$

      iii. C_L对直流通路的影响：
         1) 大电容负载：$t_f \gg t_r$，输入在输出开始改变之前就已经通过了过渡区，$V_{DSp} \approx 0, I_{SC} \approx 0$；
         2) 小电容负载：$t_f \ll t_r$，输出下降时间小于输入的上升时间，$V_{DSp} \approx V_{DD}, I_{SC} \approx I_{MAX}$；
      iv. 最小化直流通路电流能耗：短路电流能耗可以通过使输入和输出信号的

上升下降时间匹配来达到最小；

1) 当负载电容C_L较小时，功耗主要来自短路电流I_{SC}；
2) 当负载电容C_L较大时，功耗主要来自对负载电容的充放电；
3) 如果$t_f = t_r$，大部分能耗与动态功耗有关，短路仅占小部分(< 10%)；

3. 静态功耗：

$P_{stat} = V_{dd} \cdot I_{stat}$，无开关活动时电源与地之间的电流一般接近于零；

a. 反偏二极管漏电流：

$I_{DL} = J_S \times A$

其中：J_S单位面积漏电流，A结面积；

i. 结的漏电流是由热产生的，随温度升高，单位面积漏电流会指数上涨(每升高9℃翻一倍)；
ii. 优化反偏二极管漏电流：限制电路的功耗或使用能支持有效散热的封装；

b. 亚阈值电流：

i. 阈值电压越是接近$0V$，在$V_{GS} = 0$时的漏电流越大；
ii. 解决：V_T保持足够高，$> 0.5 \sim 0.6V$；
iii. 阈值电压的选择代表了在性能和静态功耗之间的权衡取舍；
iv. 电源电压持续降低迫使V_T更低，使亚阈值导电成为功耗的主要来源；
v. 生产具有迅速彻底关断特性的器件(SOI)；

4. 降低能耗的原则：

a. 降低电源电压！
b. 降低开关活性；
c. 改变晶体管尺寸；

$Device\ Sizing: for\ F = 20 \Rightarrow f_{opt}(energy) = 3.53$

d. 选择正确的电源电压和阈值电压：最佳工作点取决于电路的活动性；
e. 静态功耗较大时，可以使不工作的模块暂时断电，以免产生静态功耗；

5. 单元小结：

a. 静态反相器由PUN和PDN组成，PMOS尺寸常大于NMOS；
b. 延迟时间的决定因素；
c. 反相器能耗；

6. 作业待办：Q5.8和Q5.12；