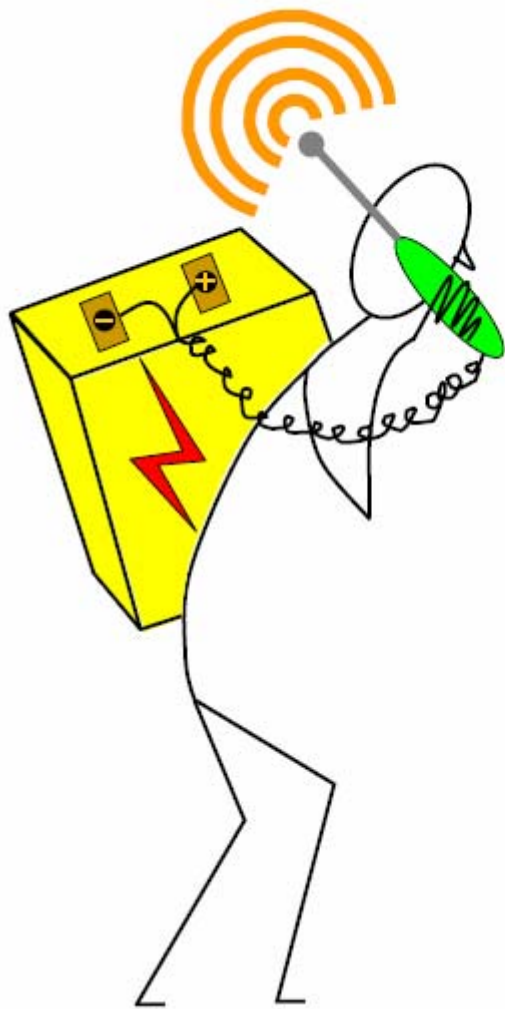


6.002

电路与  
电子学

## 电能和功率

## 为什么担忧能源问题？



小的电池  
更好？

今天：

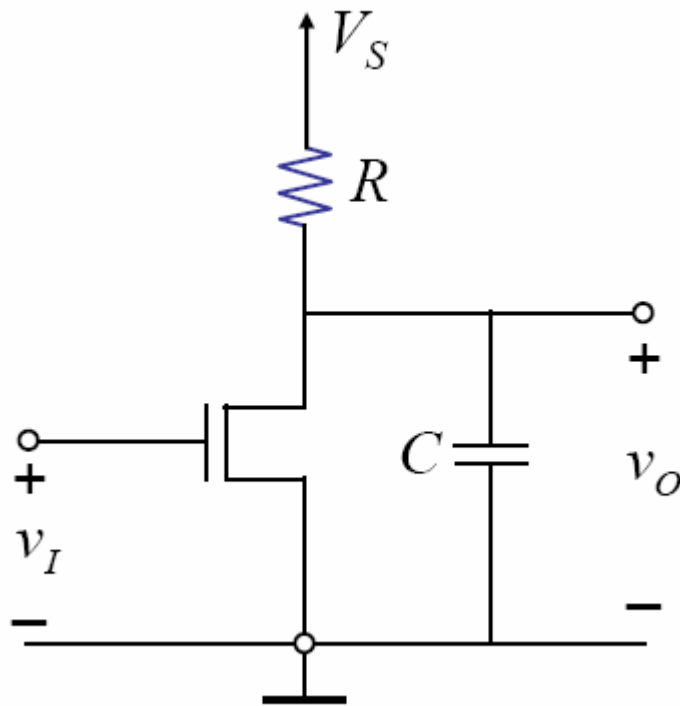
■ 电池能使用多久？

在待机时

在正常工作时

■ 芯片会不会因过热而烧坏？

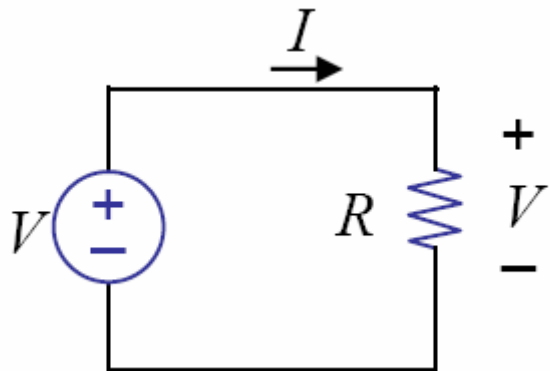
下面我们看看在MOSFET门中的能量损耗



$C$ : 分布电容和下列门的 $C_{GS}$

我们先确定一下  
待机功率  
正常工作时的功率  
首先看一些相关的例子

例1:



功率

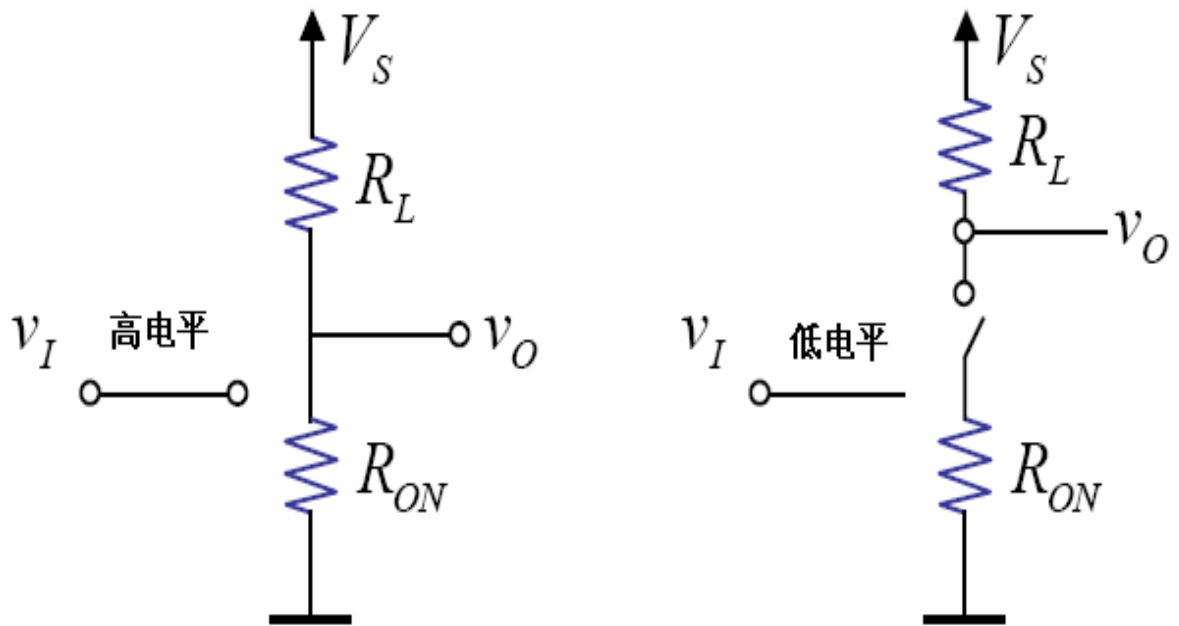
$$P = VI = \frac{V^2}{R}$$

在时间 $T$ 期间的能量损耗

$$E = VIT$$

例1:

对于门



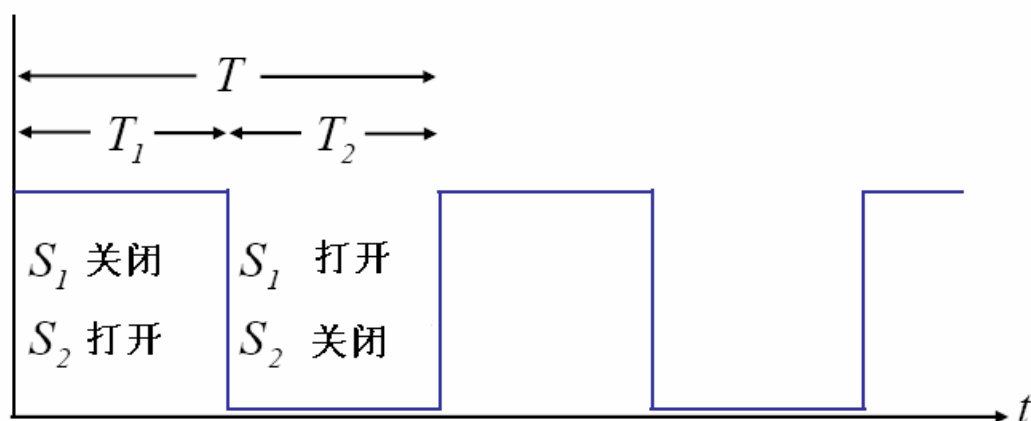
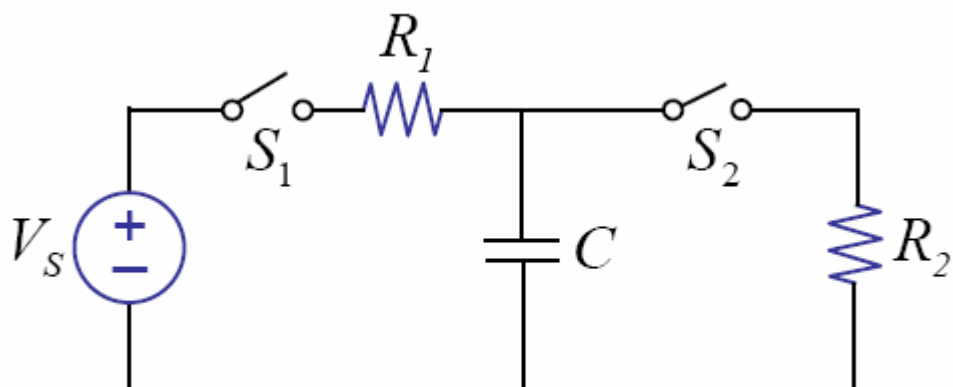
$$P = \frac{V_S^2}{R_L + R_{ON}}$$



$$P = 0$$

## 例2:

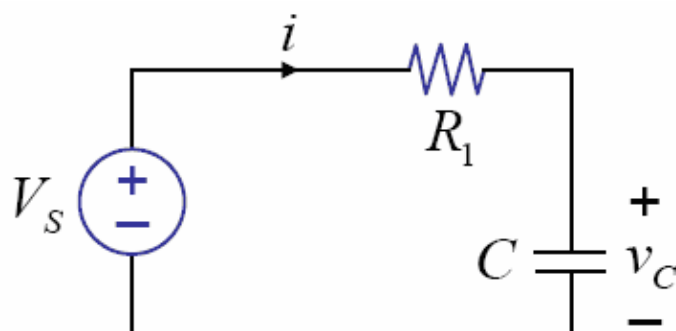
我们考虑下面的情况



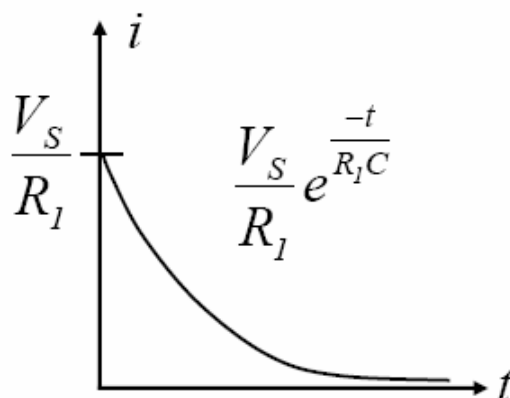
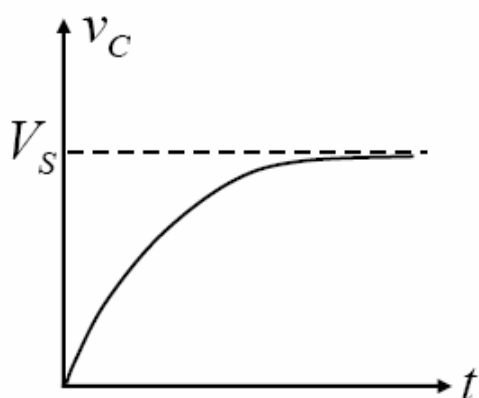
求出每个周期中的能量损耗。

求出平均功率  $\bar{P}$

$T_1$ :  $S_1$  关闭,  $S_2$  打开



假设  
在  $t=0$  时刻  $v_C = 0$



在  $T_1$  期间内由源极提供的总能量

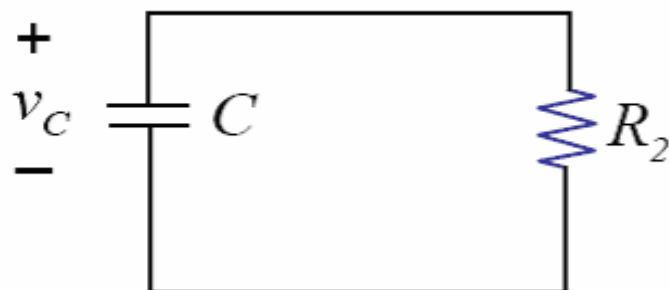
$$\begin{aligned}
 E &= \int_0^{T_1} V_S i \, dt \\
 &= \int_0^{T_1} \frac{V_S^2}{R_1} e^{\frac{-t}{R_1 C}} \, dt \\
 &= -\frac{V_S^2}{\cancel{R_1} R_1 C} e^{\frac{-t}{R_1 C}} \bigg|_0^{T_1} \\
 &= C V_S^2 \left( 1 - e^{\frac{-T_1}{R_1 C}} \right)
 \end{aligned}$$

$\approx C V_S^2$  如果  $T_1 \gg R_1 C$   
 也就是说时间足够大

$$\left. \begin{aligned}
 &\frac{1}{2} C V_S^2 && C \text{ 中储存的能量} \\
 E_1 = \frac{1}{2} C V_S^2 && R_1 \text{ 中损耗的能量}
 \end{aligned} \right\} \text{与 } R \text{ 无关}$$

$T_2$ :  $S_2$  关闭,  $S_1$  打开





初始值  $v_C = V_S$  ( 即  $T_1 \gg R_1 C$  )

所以, 初始时,

电容 $C$ 中储存的能量 $= \frac{1}{2} C V_S^2$

假设  $T_2 \gg R_2 C$

那么, 电容器在 $T_2$ 时间内完全放电

因此, 在 $T_2$ 时间内 $R_2$ 中损耗的能量

$$E_2 = \frac{1}{2} C V_S^2$$

$E_1, E_2$  与  $R_2$  无关!

下面我们将两个过程综合起来看  
则在每个周期中的能量损耗

$$E = E_1 + E_2$$

$$= \frac{1}{2} C V_s^2 + \frac{1}{2} C V_s^2$$

$$E = C V_s^2 \quad C \text{ 充电与放电过程中的能量损耗}$$

假设电容  $C$  完全充电和放电

则平均功率

$$\overline{P} = \frac{E}{T}$$

$$= \frac{C V_s^2}{T}$$

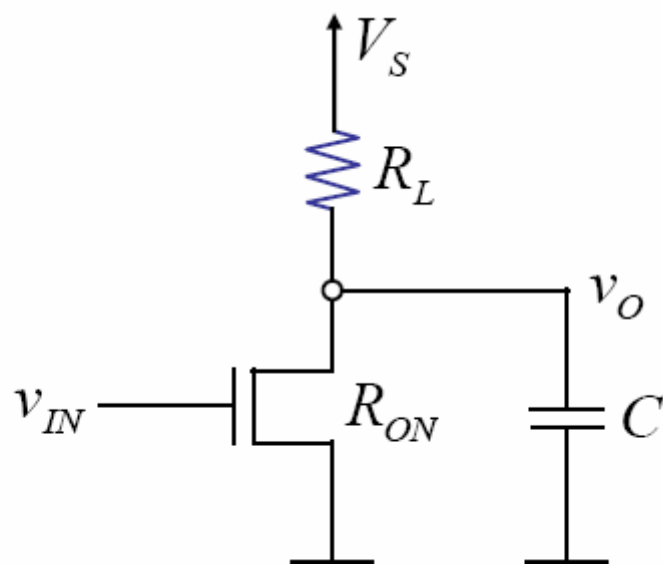
$$= C V_s^2 f$$



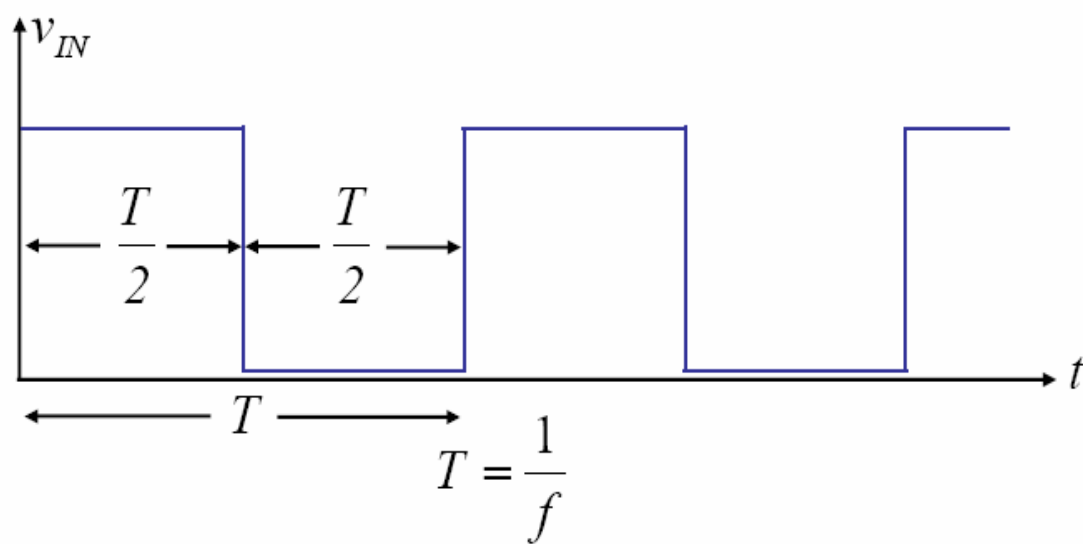
频率

$$f = \frac{1}{T}$$

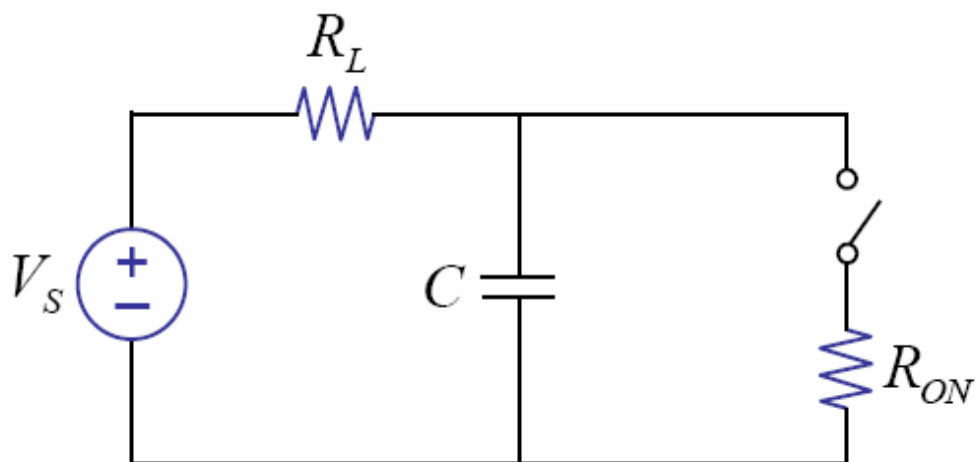
我们再回过来看一下反相器 -



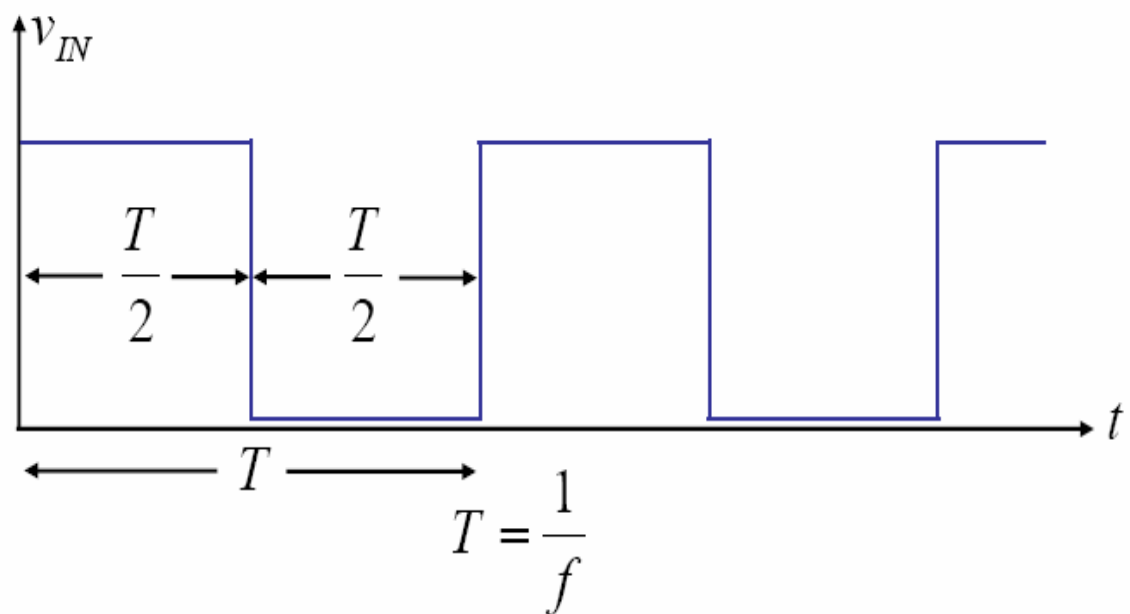
下列输入的平均功率  $\overline{P}$  是多少？



等效电路如下



下列输入的平均功率  $\overline{P}$  是多少？



门的平均功率  $\bar{P}$  是多少？

我们可用下面的式子来表示（见第 12.2 节的A & L）

$$\bar{P} = \frac{V_s^2}{2(R_L + R_{ON})} + CV_s^2 f \frac{R_L^2}{(R_L + R_{ON})^2}$$

当  $R_L \gg R_{ON}$  时

$$\bar{P} = \frac{V_s^2}{2R_L} + CV_s^2 f$$

$\bar{P}_{STATIC}$

与频率f无关  
MOSFET在一半时间 内  
工作

$\bar{P}_{DYNAMIC}$

与开关电容有关

门的平均功率  $\overline{P}$  是多少？

当  $R_L \gg R_{ON}$  时

$$\overline{P} = \frac{V_s^2}{2R_L} + CV_s^2 f$$

假设在待机状态下芯片中半数的门处于工作状态, 所以每个门的静态损耗仍然是

$$\frac{V_s^2}{2R_L}$$

与待机功率无关

在待机状态时  $f \rightarrow 0$ ,  
所以动态损耗为0

## 我们来看一些数字...

对于一个有 $10^6$ 个门时钟，频率为100 MHz  
的芯片

$$C = 1fF$$

$$R_L = 10k\Omega$$

$$f = 100 \times 10^6$$

$$V_S = 5V$$

平均功率

$$\bar{P} = 10^6 \left[ \frac{25}{2 \times 10^4} + 10^{-15} \times 25 \times 100 \times 10^6 \right]$$

$$= 10^6 [1.25 \text{ 毫瓦} + 2.5 \text{ 微瓦}]$$

注意问题！

1.25KW!

2.5W

not bad

必须避免这种情况发生

$$\propto V_S^2$$

$$\propto f$$

减小  $V_S$

$$5V \rightarrow 1V$$

$$2.5W \rightarrow 150mW$$