

## Übungen zu den „Grundlagen der Materialwissenschaft“

### Lösungen zu Übung 8: Dielektrika I

#### Aufgabe 19: Skalierung von Mikroprozessoren, RC-Zeitkonstante, Mooresches „Gesetz“

- a), b)  $U_{\text{out}}(t)$  beschreibt die Spannung am Kondensator. Wenn die externe Spannung  $U_{\text{in}}$  von 0 V auf 1,5 V steigt, wird der Kondensator geladen. Die charakteristische Ladekurve (siehe die folgende Abbildung) lässt sich beschreiben durch:

$$U_{\text{out}}(t) = 1,5 \text{ V} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right],$$

mit der charakteristischen Zeitkonstante  $\tau = RC$ . Wenn die Spannung wieder auf 0 V gestellt wird, wird der Kondensator entladen:

$$U_{\text{out}}(t) = 1,5 \text{ V} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right).$$

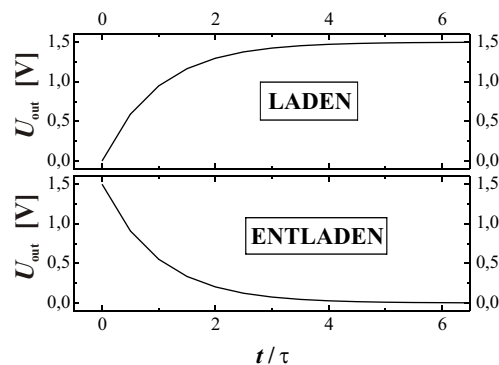


Abbildung 1: Lade- und Entladekurve eines RC-Gliedes (Zeit relativ zu  $\tau$ )

- c) Das reale Bauteil besteht nicht aus einem idealen Widerstand und einem idealen Kondensator, die in Reihe geschaltet sind; vielmehr liegen der reale Widerstand und die reale Kapazität über der Länge der Leiterbahn verteilt vor. Die Beziehung  $\tau = RC$  gilt dagegen nur für ideale, diskrete Bauteile.
- d) Mit der gegebenen Länge  $L$ , der Breite  $W$ , der Höhe  $H$  und dem spezifischen Widerstand  $\rho$  des Leitungsmaterials lässt sich der Widerstand der Leitung formelmäßig angeben:

$$R = \frac{\rho l}{A} = \frac{\rho L}{HW}.$$

- e) Die Kapazität  $C_S$  zwischen Leitung und Substrat ist näherungsweise gegeben durch:

$$C_S = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{LW}{x_{\text{ox}}}.$$

Die Kapazität zwischen zwei Leitungen ist näherungsweise gegeben durch:

$$C_1 = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{HL}{L_S}.$$

Die Gesamtkapazität  $C$  beider Leitungen ergibt sich aus der Addition beider Kapazitäten (weil  $C_S$  und  $C_I$  parallel geschaltet sind, da sowohl das Substrat als auch eine der Leitungen auf Masse liegen):

$$C = C_S + C_I = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{LW}{x_{\text{ox}}} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{HL}{L_S} = \varepsilon_0 \varepsilon_r L \left( \frac{W}{x_{\text{ox}}} + \frac{H}{L_S} \right).$$

- f) Die für den Lade-/Entladevorgang charakteristische Zeitkonstante  $\tau$  ergibt sich aus dem Produkt von  $R$  und  $C$ , welche in Aufgabenteil d) und e) ermittelt wurden:

$$\begin{aligned} \tau &= 0,89 RC = 0,89 R(C_S + C_I) \\ &= 0,89 \frac{\rho L}{HW} \varepsilon_0 \varepsilon_r L \left( \frac{W}{x_{\text{ox}}} + \frac{H}{L_S} \right) = 0,89 \frac{\rho L^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r}{HW} \left( \frac{W}{x_{\text{ox}}} + \frac{H}{L_S} \right). \end{aligned}$$

- g) Für eine minimale Strukturgröße von  $F_{\text{min}} = L_S = W = H = x_{\text{ox}} = 250 \text{ nm}$  vereinfacht sich die Gleichung aus f) für  $\tau$  zu:

$$\begin{aligned} \tau &= 0,89 \frac{\rho L^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r}{HW} \left( \frac{W}{x_{\text{ox}}} + \frac{H}{L_S} \right) = 0,89 \frac{\rho L^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r}{F_{\text{min}} F_{\text{min}}} \left( \frac{F_{\text{min}}}{F_{\text{min}}} + \frac{F_{\text{min}}}{F_{\text{min}}} \right) = 0,89 \frac{2 \rho L^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r}{F_{\text{min}}^2} \\ &= 0,89 \frac{2 \cdot 3,3 \cdot 10^{-8} \Omega \text{m} \cdot 300 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}} \cdot 3,5}{(2,5 \cdot 10^{-7} \text{ m})^2} = 9,8 \cdot 10^{-9} \text{ s} = 9,8 \text{ ns}. \end{aligned}$$

Eine Frequenz von  $f = 200 \text{ MHz} = 0,2 \text{ GHz}$  hat eine Periodendauer  $T = f^{-1} = 5 \text{ ns}$ . Die Zeitkonstante  $\tau$  der Leitung liegt in der gleichen Größenordnung wie dieser Wert, somit ist sie problematisch. Es ist üblich, den Wert  $\tau^{-1}$  als obere Grenzfrequenz anzusehen, und das sind hier  $1/(9,8 \text{ ns}) = 102 \text{ MHz}$ ; höhere Frequenzen als diese werden stark gedämpft.

Das Problem konnte in der Praxis jedoch mit einem Trick umgangen werden: Die dünnen und langen Leitungen sind nach wenigen  $\mu\text{m}$  nach oben mit dickeren Leitungen verbunden. Über der eigentlichen Verbindungsebene liegen heutzutage einige Schichten, die nur zur besseren Verbindung der Leitungen genutzt werden. Dadurch werden die Leitungen im Mittel dicker und effektiv verkürzt, so daß sich die Zeitkonstante  $\tau$  stark verringert.

- h) Als Dielektrikum wurde zu dieser Zeit in aller Regel  $\text{SiO}_2$  benutzt [vgl. Abb. 1(c) des Aufgabenblatts].