

Cena izrade i projektovanja integriranih kola

Projektovanje (Digitalnih) integriranih kola (2OEE6O06, 2OEM8A03)

dr doc. Dejan Mirković
Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, LEDA laboratorija



17. april 2021

Cena izrade integrisanog kola, C_{IC} , može se proceniti pomoću,

$$C_{IC} = VT + \frac{FT}{N_{IC}}, \quad (1)$$

gde su VT varijabilni troškovi, FT fiksni troškovi i N_{IC} broj uspešno proizvedenih integriranih kola (*volume*).

U FT spadaju troškovi projektovanja (doprinosi, licence za CAD/EDA alate, ...), marketing i plasiranje, istraživanje i razvoj (R&D *Research and Development*) itd.. U VT spadaju ugl. svi troškovi vezani za fabrikaciju poput materijala za proizvodnju, maske¹, testiranje, pakovanje itd.

Def. (Prinos). U IC projektovanju *porinos (yield)* se definiše kao postotak broja ispravnih, potpuno funkcionalnih, delova u odnosu na ukupan broj proizvedenih.

Varijabilni troškovi se mogu proceniti na osnovu (2).

$$VT = \frac{C_D + C_{DT} + C_{DP}}{P_T}, \quad (2)$$

gde je C_D cena koštanja jednog peleta (deo, die^2), C_{DT} cena testiranja peleta, C_{DP} cena pakovanja (*packaging*) peleta i P_T prinos testiranja.

Cena peleta može da se izrazi pomoću

$$C_D = \frac{C_P}{N_D \cdot P_D}, \quad (3)$$

gde je C_P cena podloge, N_D broj peleta po podlozi i P_D prinos peleta. Pošto je projekat (dizajn) pravougaonog oblika, a podloga kružnog, neminovno dolazi do gubitaka u materijalu po obodu podloge (Slika 1). Uz referencu na sliku 1, može se pokazati da je broj peleta po podlozi

$$N_D = \frac{S_P}{S_D} - K, \quad (4)$$

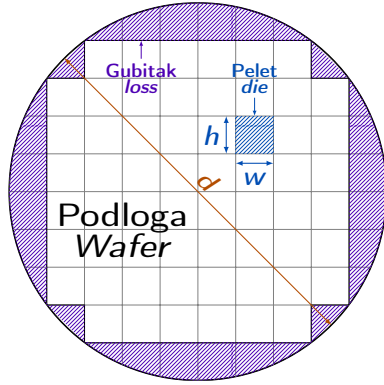
gde je $S_P = (d/2)^2\pi$ površina podloge, $S_D = w \cdot h$ površina peleta (dizajna) i

$$K = \frac{d\pi}{\sqrt{2S_D}}, \quad (5)$$

korekcionni koeficijent koji uzima u obzir gubitak u materijalu po obodu podloge.

¹Npr. za 350nm proces treba približno 20 maski, dok za 22nm proces treba približno 50 maski.

²Termin *die* potiče od termina *dice* koji se kolokvijalno koristi (često u kulinarstvu) za opisivanje postupka seckanja na sitne kockice.



Slika 1: Podloga, pelet i gubitak

Takođe treba naglasiti da neće svih N_D peleta biti ispravno nakon fabrikacije (škart). Procenat ispravnih peleta po podlozi (prinos peleta po podlozi) može se proceniti pomoću,

$$P_D = \left(1 + \frac{N_{DEF} \cdot S_D}{\alpha}\right)^{-\alpha}, \quad (6)$$

gde je N_{DEF} broj defekata po jedinici površine (obično se izražava u broj/cm²) i α koeficijent koji ugl. zavisi od broja maski za dati proces. Okvirno, za procese 350nm-45nm, može se usvojiti $\alpha \approx 3$.

PRIMER 1: Odrediti broj ispravnih peleta za CMOS proces koji ima sledeće parametre, $d = 200\text{nm}$, $N_{DEF} = 0.5\text{cm}^{-1}$, $S_D = 2\text{mm} \times 2\text{mm}$ i $\alpha = 4$.

REŠENJE 1:

$$N_D = \frac{(d/2)^2 \pi}{S_D} - \frac{d\pi}{\sqrt{2S_D}} = 7631$$

$$P_D = \left(1 + \frac{N_{DEF} S_D}{\alpha}\right)^{-\alpha} = 0.98025 \text{ (98.025\%)}$$

$$M_D = P_D N_D = 7480$$

$$\Delta N_D = N_D - M_D = 151 \quad \square$$

Od ukupno 7631 peleta na podlozi, u proseku, 7480 je ispravnih a 151 je neispravnih.

PRIMER 2: Odrediti cenu jednog peleta čije su dimenzije $h = 10\text{mm}$, $w = 5\text{mm}$, ako je izabrana podloga od 12 inča čija je cena 335€. Parametari procesa su $\alpha = 3$ i $N_{DEF} = 1.2\text{cm}^{-1}$.

REŠENJE 2:

$$d = 12\text{inch} \approx 300\text{mm}$$

$$S_D = wh = 50\text{mm}^2$$

$$N_{DEF} = 1.2\text{cm}^{-2} = 0.012\text{mm}^2$$

$$K = \frac{d\pi}{\sqrt{2S_D}} = 95$$

$$N_D = \frac{(d/2)^2 \pi}{S_D} - K = 1318$$

$$P_D = \left(1 + \frac{N_{DEF} S_D}{\alpha}\right)^{-\alpha} = 0.5787 \text{ (57.87\%)}$$

$$M_D = P_D N_D = 763$$

$$C_D = \frac{C_P}{N_D P_D} = \frac{C_P}{M_D} = 0.323\text{€} \quad \square$$

PRIMER 3: Za koliko procentualno treba redukovati površinu peleta kako bi se ostvarila ušteda od 50% u odnosu na primer 2.

REŠENJE 3:

$$\begin{aligned}
C_{D0} &= 0.323\text{€}, C_{D1} = C_{D0}/2 = 0.1615\text{€} \\
S_{D0} &= 50\text{mm}^2, S_P = (d/2)^2 \pi = 70686\text{mm}^2 \\
C_{D1} &= \frac{C_P}{N_{D1}P_D} \Rightarrow N_{D1} = \frac{C_P}{C_{D1}P_D} = 3584 \\
N_D &= \frac{S_P}{S_{D1}} - \frac{d\pi}{\sqrt{2S_{D1}}} \Rightarrow S_{D1}N_{D1}\sqrt{2} = S_P\sqrt{2} - d\pi\sqrt{S_{D1}} \\
x &= \sqrt{S_{D1}} \Rightarrow (N_{D1}\sqrt{2})x^2 + (d\pi)x - S_P\sqrt{2} = 0 \wedge x > 0 \\
x_{1,2} &= \frac{-d\pi \pm \sqrt{(d\pi)^2 + 4(N_{D1}\sqrt{2})(S_P\sqrt{2})}}{2\sqrt{2}N_{D1}} = \begin{cases} x_1 = 4.349\text{mm} \\ x_2 = -4.535\text{mm} \end{cases} \\
S_{D1} &= x_1^2 = 18.914\text{mm}^2 \\
\Delta S_D &= S_{D0} - S_{D1} = 31.086\text{mm}^2, \delta S_D = \frac{\Delta S_D}{S_{D0}} = 0.6217 \text{ (62.17\%)} \quad \square
\end{aligned}$$

Da bi se ostvarila tražena ušteda u ceni peleta potrebno je redukovati površinu dizajna za oko 62%.

Sistematizacija

Uz referencu na sliku 1 u Tabeli 1 su sistematizovane sve formula za procenu cene izrade integrisanog kola.

Tabela 1: Sistmatizacija

Formula	Opis
$C_{IC} = VT + \frac{FT}{N_{IC}}$	Cena integrisanog kola = varijabilni troškovi + (fiksni troškovi)/(broj uspešno proizvedenih čipova)
$V_T = \frac{C_D + C_{DT} + C_{DP}}{P_T}$	Varijabilni troškovi = (cena peleta + cena testiranja peleta + cena pakovanja peleta)/(prinos testiranja)
$S_P = \pi (d/2)^2$	Površina podloge = $\pi \times (\text{poluprečnik})^2$
$S_D = hw$	Površina peleta = visina \times širina
$C_D = \frac{C_P}{P_D N_D}$	Cena peleta = (cena podloge) / (prinos peleta po podlozi \times broj peleta po podlozi)
$P_D = \left(1 + \frac{N_{DEF} S_D}{\alpha}\right)^{-\alpha}$	$(1 + (\text{broj defekata po podlozi} \times \text{površina peleta}) / \alpha)^{-\alpha}$, α - koeficijent proporcionalan broju maski ($\alpha \approx 3$)
$K = \frac{\pi d}{\sqrt{2S_D}}$	Korekcionni faktor = $(\pi \times \text{prečnik podloge}) / \sqrt{2 \times \text{površina peleta}}$
$N_D = \frac{S_P}{S_D} - K$	Broj peleta po podlozi = (površina podloge)/(površina peleta) - korekcionni faktor

Analizom relacija datih u Tabeli 1 može se pokazati,

$$P_D \propto \frac{1}{S_D^\alpha}, N_D \propto \frac{1}{S_D} \Rightarrow C_D \propto S_D^{\alpha+1} \Rightarrow \boxed{\{C_{IC}, V_T\} \propto S_D^{\alpha+1}}. \quad (7)$$

Generalno, cena integrisanog kola je približno proporcionalna četvrtom stepenu površine peleta (dizajna) ($C_{IC} \propto S_D^4$).