

С.П. Новосядлий, О.Б. Фрик

Техніко-економічний аналіз субмікронної технології формування структур великих інтегральних схем

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,
вул. Шевченка, 57, Івано-Франківськ, 76025, Україна*

Розроблена методика техніко-економічного аналізу технологічного процесу виготовлення кристалів субмікронних великих інтегральних схем (ВІС). Отримані та проаналізовані вирази для собівартості кристалу і пластини в залежності від параметрів технологічного процесу, його технологічних обмежень та прецизійності обладнання. В рамках автоматизованого робочого місця (АРМ) атестації технологічного маршруту для випуску спецвиробів розроблена програма вартісного аналізу.

Ключові слова: інтегральні схеми (ІС), субмікронні структури, собівартість пластин, придатність кристалу.

Стаття поступила до редакції 07.04.2008; прийнята до друку 15.09.2008.

Закономірності розвитку мікроелектроніки, як і будь-якої галузі виробництва, визначаються економічними законами. Сьогодні електроніка визначає не тільки енергоспоживання, але й інформаційний розвиток суспільства. Тому інтегральні схеми, які випускаються чи можуть випускатись підприємствами повинні бути економічними не тільки для підприємств-виготовлювачів, але за якістю та ціною повинні бути конкурентноздатними на світовому ринку. При переході на ринкову економіку доходи від продажі ІС повинні покривати всі витрати підприємства на їх виробництво і реалізацію [1,2,3], а також створювати прибуток – головний показник ефективної роботи, що визначається різницею між ціною і собівартістю ІС. Звідси випливає, що прибуток залежить від зниження собівартості ІС, що випускаються підприємством.

Конструкторські, схемотехнічні і технологічні рішення, що приймаються в процесі проектування і виробництва ІС, відбиваються на способі формування і цеховій собівартості, яка визначається як [7,8]:

$$S_{\text{цех}} = L + M + B + S_{\text{з.ц.в.}} \quad (1)$$

де L – основна і додаткова заробітна плата з урахуванням соціального страхування, M – витрати на основні та додаткові матеріали технологічного процесу, включаючи комплектуючі вироби (корпуси, пластини), B – витрати, зв'язані з роботою схемотехнологічного обладнання, T – витрати, пов'язані з технологічними втратами, $S_{\text{з.ц.в.}}$ – загальноцехові витрати.

Технологічний процес виробництва ІС можна

розділити на три стадії: обробка напівпровідникових пластин з метою виготовлення структур кристалів ВІС, монтаж кристалів в корпус чи на стрічковий носій, який включає в себе всі складальні операції, вимірювання та випробування ВІС згідно технології та технічних умов. Тому вихід придатних ІС буде визначатись як:

$$Y = Y_{\text{кр}} * Y_{\text{сил}} * Y_{\text{випр}} \quad (2)$$

де $Y_{\text{кр}}$ – загальний вихід придатних кристалів, тобто відношення числа придатних кристалів до їх числа на початку обробки, $Y_{\text{сил}}$ – вихід придатних кристалів на операціях монтажу кристалу в корпус, $Y_{\text{випр}}$ – вихід придатних кристалів після проведення вимірювань та випробувань.

Технологічні втрати ІС на стадіях складання та випробувань не перевищують декількох відсотків, тому особливий інтерес представляє аналіз загального виходу придатних кристалів, на які припадає брак через незнання фізико-хімічних мікропроцесів. Для обміну втрачених при отриманні придатних кристалів використовують поопераційні коефіцієнти виходу придатних пластин із їх запуску у виробництво, які для i -тої операції визначаються як:

$$Y_{\text{пл}}(i) = \frac{n(i)}{n(i-1)}, \quad (3)$$

$$K(i) = \frac{1}{\prod_{j=i}^N Y_{\text{пл}}(j)}, \quad (4)$$

де $n(i-1)$ і $n(i)$ – відповідно число придатних пластин, які поступили на i -ту операцію і які вийшли з неї; N – кількість операцій в технологічному маршруті.

На сьогодні економічні і технологічні служби

підприємств при плануванні виробництва і цехової собівартості ІС використовують метод від досягнутого рівня шляхом корекції коефіцієнтів запуску, витрат на матеріали, обладнання і заробітну платню для укрупнених стадій технологічного процесу. Наприклад, для розрахунку питомої цехової собівартості ІС використовують формулу [1,5]:

$$S_{цех} = \left(\frac{S_{H1}}{Y_{кр} Y_{сил} Y_{випр}} + \frac{S_{H2}}{Y_{сб} Y_{випр}} + \frac{S_{H3}}{Y_{випр}} \right) + \frac{C_{цех}}{Q_{випр}}, \quad (5)$$

де $C_{цех}$ – умовно-постійні витрати на плановий об'єм випуску; S_{H1} , S_{H2} , S_{H3} – нормовані прямі витрати на одиницю фізичного виробу відповідно на стадіях виготовлення кристалу, складання, випробувань ІС; $Q_{випр}$ – плановий об'єм випуску придатних ІС.

Результати укрупнених розрахунків за формулою (5) не враховують детальні коопераційні витрати на всьому технологічному маршруті, відповідно, не дозволяють визначити найбільш витратоємні операції, які ще називають вузькими місцями, та розробляти конкретні організаційно-технічні заходи для планового зниження собівартості кристалу. В даній роботі розглядається облік поопераційних витрат на всьому процесі виготовлення кристалу за допомогою методики технологічної атестації операцій і обладнання виробництва ІС, автоматизованого робочого місця (АРМ) та атестації всього технологічного маршруту [8,9].

Загальний вихід придатних Y із партії запущених пластин визначаються двома факторами: виходом придатних пластин $Y_{пл} = \frac{n(0)}{n(N)} = \prod_{i=1}^N Y_{пл}(i)$ із всього технологічного процесу із N операцій ($n(0)$ – початкова кількість пластин в партії, $n(N)$ – кількість технологічно придатних пластин в партії після проходження N операцій маршруту) і середнім виходом придатних кристалів з пластини $Y_{кр.пл}$ (долею придатних кристалів на пластинах $n(N)$, які доходять до кінця маршруту), тобто:

$$Y = Y_{пл} Y_{кр.пл} \frac{n(N)}{n(0)} \cdot \frac{Y_{кр.пл} H}{H} \quad (6)$$

де H – кількість кристалів на пластині.

Якщо $Y_{пл} = 70-90\%$, $Y_{кр.пл} = 50-60\%$, це говорить про якісну технологію. Значення $Y_{пл}$ в основному зв'язано з непрямою обробкою пластин, ломкою, сильним забрудненням пластин в результаті неякісної роботи обладнання, а $Y_{кр.пл}$ – із забрудненням мікрочастинками, які формують точкові дефекти (кварцева чи кремнієва пилюка) і виходом параметрів структури та операційних параметрів за технологічні допуски [7,8,9].

Згідно [5] технологічний вихід придатних пластин з i -тої операції $Y_{пл}(i)$ і технологічний вихід придатних кристалів з пластини на i -тій операції $Y_{кр.пл}(i)$ можна записати у вигляді:

$$Y_{пл}(i) = 1 - \frac{T_{ц}(i)}{t_{отк}(i)} \quad (7)$$

$$Y_{кр.пл}(i) = \left[\prod_{k=1}^b 2\Phi_k \left(\frac{\delta_k}{2\sigma_k} \right) \right] \cdot \left[\frac{1 - \exp(-D_i A)}{D_i A} \right] \quad (8)$$

де $T_{ц}(i)$ – час обробки партії пластин на i -тій операції, $t_{отк}(i)$ – час напрацювання на відмову обладнання для i -тої операції, b – число незалежних технологічних

параметрів на i -тій операції, $\Phi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^U e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ –

табульований інтеграл імовірності, δ_k , σ_k – відповідно технологічний допуск і середня квадратична похибка виставлення технологічного допуску на кожному параметру на i -тій операції, D_i – густина дефектності на i -тій операції, A – площа кристалу.

Собівартість одного придатного кристалу буде:

$$S_{кр} = \frac{S_{пар}}{n(N)H \cdot Y_{кр.пл}} \quad (9)$$

де $S_{пар}$ – витрати на обробку партії пластин з початковою кількістю пластин $n(0)$ по всьому технологічному маршруту, який складається із N операцій.

$$S_{пар} = n(0) s(1) + n(1) s(2) + \dots + n(N-1) s(N) = \sum_{i=1}^N n(i-1) S(i) \quad (10)$$

де $n(i-1)$ – кількість пластин, які поступили на i -ту операцію, $S(i)$ – витрати на проведення i -тої операції.

Підставляючи вирази (10) і (9) з урахуванням (3) і (4) отримуємо:

$$S_{кр} = \frac{\sum_{i=1}^N S(i) K(i)}{HY_{кр.пл}} = \frac{\sum_{i=1}^N S(i) \prod_{j=i}^N \frac{1}{Y_{пл}(j)}}{HY_{кр.пл}} \quad (11)$$

Згідно цього виразу можна дослідити залежність собівартості придатного кристалу від наступних факторів: від коефіцієнту виходу кристалів з пластин, а відповідно із виразу (8) від густини дефектів, площі кристалу і співвідношення між технологічними допусками і середніми квадратичними похибками їх виставлення, від числа кристалів на пластині, від технологічного виходу придатних кристалів з будь-якої операції маршруту, а відповідно з урахуванням (7) від продуктивності та надійності обладнання на будь-якій операції маршруту (вартості обробки), яку можна подати як:

$$S(i) = L(i) + M(i) + B(i) \quad (12),$$

а відповідно, від тарифної ставки операторів $L(i)$, вартості матеріалів $M(i)$ і вартості амортизації обладнання $B(i)$ на будь-якій операції.

Вартість амортизації обладнання на i -тій операції в розрахунку на одну фізичну пластину визначається як:

$$B(i) = \frac{S_{об} N_a T_{оп}}{M_{пл} T_{об} K_{вик}} \quad (13)$$

де $S_{об}$ – ціна обладнання, N_a – норма амортизації обладнання, $T_{оп}$ – тривалість i -тої операції, $M_{пл}$ – кількість одночасно оброблювальних пластин, $T_{об}$ – календарний термін роботи обладнання; $K_{вик} = T_{то}/T_{об}$ – коефіцієнт використання обладнання, рівний відношенню часу, упродовж якого на обладнанні проводяться технологічні операції ($T_{то}$), до календарного терміну роботи.

Під собівартістю пластини після i -тої операції

$S_{пл}(i)$ розуміють суму всіх витрат на обробку партії пластин по i -ту операцію включно, що припадає на одну придатну пластину. Приріст собівартості пластини на i -тій операції $S_{пл}(i)$ – це різниця між собівартістю пластини після i -тої та $(i-1)$ операцій. Згідно визначення собівартості, ми можемо записати:

$$S_{пл}(i) = \frac{n(0)S(1) + n(2)S(2) + \dots + n(i-1)S(i)}{U(i)} =$$

$$= \frac{S(1)}{Y_{пл}(1) \cdot Y_{пл}(i)} + \frac{S(2)}{Y_{пл}(2) \cdot Y_{пл}(i)} + \frac{S(i)}{Y_{пл}(i)}$$

Звідки

$$\Delta S(i) = S_{пл}(i) - S_{пл}(i-1) = \frac{1 - Y_{пл}(i)}{Y_{пл}(i)} \cdot F \cdot \frac{S(1)}{Y_{пл}(1) \dots Y_{пл}(i-1)} +$$

$$+ \frac{S(2)}{Y_{пл}(2) \dots Y_{пл}(i-1)} + \dots + \frac{S(i-1)}{Y_{пл}(i-1)} + \frac{S(i)}{Y_{пл}(i)} \quad (14)$$

Аналіз цього виразу (14) дозволяє зробити наступні висновки.

Якщо технологічний вихід пластин з i -тої операції $Y_{пл}(i) = 1$, то перший доданок в (14) є рівним нулю, а відповідно, приріст вартості пластини не залежить від попередніх операцій і рівний вартості проведення i -тої операції $S(i)$. Якщо $Y_{пл}(i) < 1$, то приріст вартості на i -тій операції залежить від попередньої обробки партії з першої по $(i-1)$ -ту операцію і вартість тим більша, чим нижчий був технологічний вихід пластин на всіх попередніх операціях. Чим ближче $Y_{пл}(i)$ до одиниці, тим менший вплив попередньої обробки партії пластин на заробітну платню i -ого оператора.

Для вирішення багатьох економічних задач виробництва кристалів необхідно знати чутливість собівартості придатного кристалу до зміни вартості i -тої операції $S(i)$ і технологічного виходу придатних пластин з i -тої операції. Визначимо чутливість собівартості кристалу використовуючи вираз:

$$AS(i) = \frac{\partial S_{кр}}{\partial S(i)} \frac{S(i)}{S_{кр}} = \frac{S(i)R(i)}{\sum_{i=1}^N S(i)R(i)} \quad (15)$$

$$AY_{пл}(i) = \frac{\partial S_{кр}}{\partial Y_{пл}(i)} \frac{Y_{пл}(i)}{S_{кр}} = \frac{\sum_{j=1}^i S(j)R(j)}{\sum_{i=1}^N S(i)R(i)} \quad (16)$$

Чутливості $AS(i)$ та $AY_{пл}(i)$ показують на скільки відсотків зміниться собівартість придатного кристалу $S_{кр}$ при зміні на 1% величини $S(i)$ або $Y_{пл}(i)$. Річна економія за рахунок зменшення вартості операції на 1% і підвищення технологічного виходу придатних пластин з i -тої операції на 1% визначається наступним чином:

$$ES(i) = \frac{AS(i)S_{кр}Q_{вип}}{100} = \frac{S(i)R(i)Q_{вип}}{HY_{крпл} \cdot 100} \quad (17)$$

$$EY_{пл}(i) = \frac{AY_{пл}(i)S_{кр}Q_{вип}}{100} = \frac{\left[\sum_{j=1}^i S(j)R(j)Q_{вип} \right]}{HY_{крпл} \cdot 100} \quad (18)$$

де $Q_{вип}$ – річний випуск кристалів ВІС.

Із виразів (17) та (18) можна зробити висновок, що на всіх операціях, крім першої, вигідно на 1% підвищувати технологічний вихід придатних пластин, ніж на 1% підвищувати вартість проведення операції.

Якщо збільшення річної економії $EY(i)$ супроводжувались додатковими капітальними затратами K на підвищення надійності та точності технологічного обладнання, то для економічної вигоди вказаної технічної модернізації необхідно виконати умову:

$$\frac{K}{EY_{пл}(i)} \leq T_{ок} \quad (19)$$

де $T_{ок}$ – нормативний термін окупності.

Таким чином, отримані аналітичні вирази (5)-(16) дозволяють обчислити собівартість кристалів і пластин в залежності від параметрів технологічного процесу та обладнання, а вирази (17)-(19) – визначають економічну ефективність від організаційно-технічних заходів матриці, направлених для підвищення цих параметрів. Вказаний вартісний аналіз може бути виконаний в програмному пакеті Mathlab для різних варіантів з метою вибору оптимального.

Як бачимо, всі зусилля необхідно направити на значний ріст виходу придатних по пластині $Y_{пл}$ або кристалу $Y_{кр}$, бо в цьому разі різко зменшуються витрати на операціях маршруту. Вихід придатних по пластині до рівня 90% та по кристалу до 75-85 % для субмікронних структур досягається за рахунок [1,5]:

- Технології гетерування домішок і дефектів з використанням зовнішнього чи внутрішнього гетерів.
- Низькотемпературним осадженням функціональних шарів з низькою дефектністю $< 0,05 \text{ см}^{-2}$ та високою конформністю $> 0,95$.
- Багатозарядною імплантацією, яка ефективно формує ретроградні контакти і кишені.
- Анізотропним плазмохімічним травленням в НВЧ-реакторах електронно-циклотронного резонансу.
- Висококонтрасною проекційною літографією з використанням амплітудно-фазозсувних фотошаблонів (ПФО).
- Аероіонізацією чистих локальних зон та ультрафільтрацією хімреактивів, газів, деіонізованої води.
- Використанням високопродуктивного і чистого кластерного обладнання з індивідуальною обробкою Si-пластин та вакуумними треками.
- Тестовим контролем дефектності, електрофізичних та електричних параметрів елементів субмікронних пластин.
- Системою автоматизованого проектування субмікронних структур з мінімальними проектними нормами конструкторсько-технологічних обмежень.
- Доведенням технологічного циклу формування структур при неперервній роботі

модуля до 4-6 дБ.

Головними чинниками, які визначають собівартість кристалів ВІС є: вартість Si-пластин, реакторного оснащення, спецгазів, 1 м^2 чистої локальної зони 1 або 0,1 (для діаметра мікрочастинок $\leq 0,1 \text{ мкм}$).

- [1] С.П. Новосядлий. *Фізико-технологічні основи субмікронної технології великих інтегральних схем*. Сімик, Івано-Франківськ. 351 с. (2003).
- [2] С.П. Новосядлий. Шляхи і перспективи розвитку кремнієвої комп'ютерної технології // *Наука і наукознавство*, 2, сс. 65-72 (1999).
- [3] С.П. Новосядлий. Шляхи підвищення роздільної здатності проекційної літографії // *Металофізика і новітні технології*, **24**(8), сс. 1073-1082 (2002).
- [4] С.П. Новосядлий. Плазменная технология формирования субмикронных структур БИС // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 6, сс. 57-63 (2002).
- [5] А.В. Проскуратов, А.С. Моисеева, Ю.П. Анискин. *Экономика и организация разработки, освоения и производства изделий микроэлектроники*. Высшая школа, М. 160 с. (1987).
- [6] А.А. Андреев, В.Ю. Киреев, А.Е. Максименко. Автоматизированная информационная система производства кристаллов БИС // *Электронная техника. Микроэлектроника*, **134**(5), сс. 42-45 (1989).
- [7] Г. Келл. Российская электроника на пороге XXI века // *Электронные компоненты*, 1-2 (5), сс. 4-5 (1997).
- [8] С. Зи. *Технология СБИС*. Мир, М. 453 с. (1981).
- [9] M. Penn. Eastern Europe in the global microelectronics world // *Microelectronics Journal*, **27**(8), pp. 767-775 (1996).

S.P. Novosjadly, O.B. Fryk

Techno-Economic Analysis of the Submicron Technology of Large Scale Integration Structures Formation

*Vasyl Stefanyk Precarpathian National University,
57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76025, Ukraine*

The procedure of the techno-economic analysis of the submicron Large Scale Integration structures formation chips manufacturing process is elaborated in the article. The expressions for the chip and plate cost versus technological process qualities, its processing limits and the equipment precision have been received and analyzed. Within the bounds of the flow certification work station for the technical articles production the price analysis program has been provided.