

УДК 514.174 (621.37)

**АЛГОРИТМ РАЗМЕЩЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ
НА КРЕМНИЕВОЙ ПЛАСТИНЕ**

© 2010 г.

С.Г. Мосин

Владимирский госуниверситет

smosin@vpti.vladimir.ru

Поступила в редакцию 19.11.2008

Предложен итерационный алгоритм оптимального размещения кристаллов ИС на кремниевых пластинах. Определены критерии выбора оптимального решения. Представлены результаты работы алгоритма для ряда экспериментов. Проведено сравнение с одним из существующих методов решения. Дана оценка предложенного алгоритма.

Ключевые слова: интегральная схема, кристаллы, оптимальное размещение.

Введение

Эффективность функционирования технологической линии по производству интегральных схем (ИС) принято оценивать количеством исправных схем, полученных на каждой кремниевой пластине (*GCPW – good chips per wafer*) [1]. Данный показатель непосредственно зависит от процента выхода годных ИС (*Yield*) и количества кристаллов ИС, которые могут быть размещены на пластине (*CPW – chips per wafer*). Повышение процента выхода годных интегральных схем обеспечивают на этапе проектирования, применяя передовые маршруты и методологии, например тестопригодное проектирование (*DFT – design for testability*) и проектирование, ориентированное на изготовление (*DFM – design for manufacturing*) [2], а также на этапе производства, контролируя соблюдение требуемых условий функционирования технологической линии.

Количество *CPW* в общем случае зависит от диаметра кремниевой пластины и геометрических размеров кристалла ИС, а также от используемого правила размещения множества прямоугольных кристаллов ИС в плоскости, ограниченной окружностью заданного диаметра. Основное требование при размещении – все кристаллы обладают одинаковым размером и должны быть расположены вплотную друг к другу (с учетом полосы распила) с выравниванием в виде матрицы. Небольшие смещения (как по горизонтали, так и по вертикали) такой матрицы относительно окружности могут приводить к изменению числа кристаллов, которые полностью расположены внутри окружности, т.е. оказывают влияние на *CPW*. Цель – найти

такой способ размещения, который позволит расположить максимальное число прямоугольных кристаллов ИС, обладающих одинаковым размером, на пластине кремния, т.е.

$$f = \max(CPW) \text{ при } \{x_i, y_i\} \in C_d, \\ \forall (i, j) \in \{1..CPW\},$$

где C_d – множество точек круга диаметром d .

К настоящему времени предложено несколько решений данной задачи. В основном все они ориентированы на применение для двух-, четырех- и шестидюймовых пластин, которые обладают плоской площадкой в основании [3, 4]. В работе [5] описан наиболее широко используемый метод, при котором центр пластины совмещают с центром кристалла ИС и относительно него располагают остальные кристаллы. Такой способ обеспечивает симметричность размещения кристаллов относительно окружности, однако не гарантирует максимального значения *CPW*. В [6] авторы описывают алгоритм размещения кристаллов для восьмидюймовых пластин, которые не содержат плоского основания, использующий выравнивающие маркеры.

В настоящей работе предложен итерационный алгоритм, обеспечивающий поиск оптимального размещения кристаллов на восьми- или двенадцатидюймовой кремниевой пластине по критерию максимума числа *CPW* и наибольшего удаления от допустимой границы окружности. Ориентация на данный тип пластин обусловлена их широким практическим использованием при производстве ИС. В разделе 1 приведено общее описание алгоритма. Экспериментальная часть и результаты использования алгоритма представлены в разделе 2.

1. Итерационный алгоритм размещения кристаллов ИС

Размещение кристаллов на пластине – операция, предшествующая формированию масок фотошаблонов. К этому моменту завершены все проектные операции, результат которых – топология интегральной схемы, разработанная под заданную интегральную технологию. Внешними параметрами для решения задачи размещения являются геометрические размеры прямоугольного кристалла – ширина (W_c) и длина (L_c) с учетом полосы распила, а также диаметр используемой кремниевой пластины (D_w), который зависит от технологического оборудования, применяемого при производстве ИС. На практике вместо параметра D_w принято использовать эффективный радиус пластины (R_{eff}), вычисляемый по выражению (1), который позволяет исключить из рассмотрения запрещенные участки вдоль границы пластины

$$R_{eff} = D_w/2 - W_B, \quad (1)$$

где W_B – ширина запрещенной области по границе пластины (рис. а). W_B – параметр, специфический для каждой технологической линии.

Предложенный алгоритм можно представить следующей последовательностью шагов.

Шаг 1. Получение внешних параметров W_c , L_c и R_{eff} .

Шаг 2. Выбор координат опорной точки расположения кристаллов (x_0, y_0). Опорная точка будет участвовать в разбиении пластины на

шесть областей (рис. б). Вычисление значений для x_0 и y_0 происходит с помощью выражений (2) и (3) по критерию максимума числа кристаллов, которые можно расположить в прямоугольнике, образованном областями 3 и 5:

$$x_0 = \begin{cases} N W_c, & \text{если } N[2y_1/L_c] > (N+1)[2y_2/L_c]; \\ (N+1)W_c, & \text{если } N[2y_1/L_c] \leq (N+1)[2y_2/L_c]; \end{cases} \quad (2)$$

$$y_0 = \begin{cases} y_1 - \frac{[2y_1/L_c]L_c}{2}, & \text{если } N[2y_1/L_c] > (N+1)[2y_2/L_c]; \\ y_2 - \frac{[2y_2/L_c]L_c}{2}, & \text{если } N[2y_1/L_c] \leq (N+1)[2y_2/L_c], \end{cases} \quad (3)$$

где оператор $[]$ означает целую часть значения скобочного выражения, N – целое число кристаллов, помещающихся на отрезке от 0 до x_1 :

$$N = [R_{eff} / \sqrt{2}W_c],$$

y_1 и y_2 – координаты точек пересечения окружности с прямыми, которые проходят перпендикулярно оси абсцисс через точки x_1 и x_2 , вычисляемые по формулам (4) и (5) соответственно

$$y_1 = \sqrt{R_{eff}^2 - (N W_c)^2}, \quad (4)$$

$$y_2 = \sqrt{R_{eff}^2 - ((N+1)W_c)^2}. \quad (5)$$

Через точки с координатами $(-x_0, y_0)$ и (x_0, y_0) проводим две направляющие L_1 и L_2 , перпендикулярные оси абсцисс, которые разде-

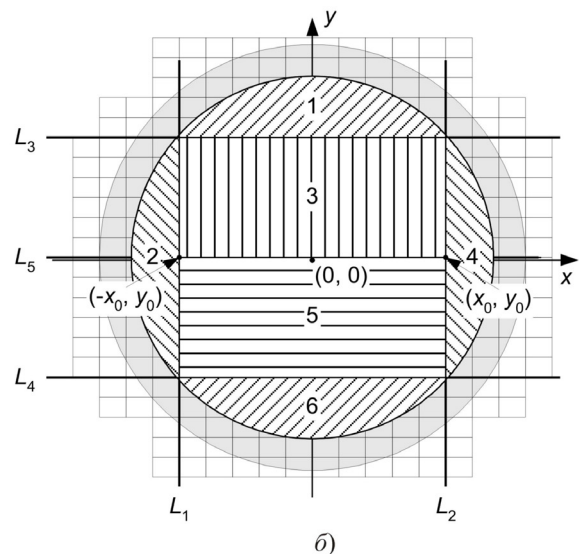
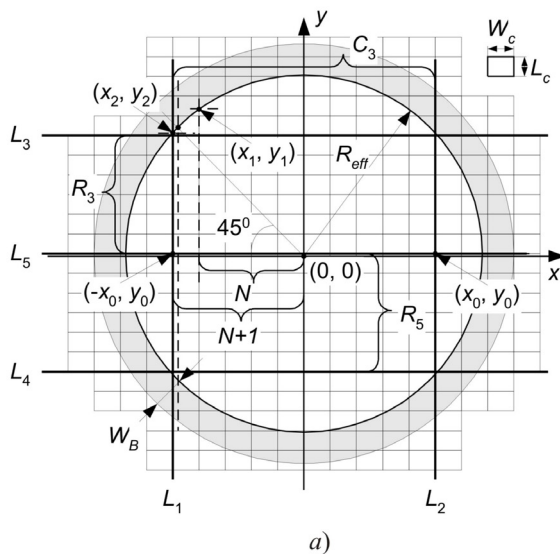


Рис. Размещение кристаллов ИС на пластине: основные обозначения (а), разбиение на шесть областей (б)

ляют окружность на три области по горизонтали. Направляющие L_3 и L_4 проходят параллельно оси абсцисс на уровнях $(R_3L_c) + y_0$ и $(R_5L_c) - y_0$, где R_3 и R_5 – количество строк с кристаллами в области 3 и 5 соответственно. Направляющая L_5 проходит через точки с координатами $(-x_0, y_0)$ и (x_0, y_0) параллельно оси абсцисс. Прямые $L_1 - L_5$ позволяют разделить пластину на шесть областей. Подсчет количества кристаллов для каждой области выполняется по разным правилам.

Шаг 3. Вычисление числа кристаллов в области 3 ($CPW3$). Поскольку все кристаллы в области 3 не выходят за границу окружности, то их количество можно посчитать через произведение R_3 на число кристаллов (C_3), расположенных между направляющими L_1 и L_2 (6):

$$CPW3 = R_3 C_3, \quad (6)$$

где $R_3 = \left[\left(\sqrt{R_{eff}^2 - x_0^2} - y_0 \right) / L_c \right]$, $C_3 = \lfloor 2x_0 / W_c \rfloor$.

Для первого кристалла в строке R_3 рассчитывается расстояние от верхнего левого угла до края окружности

$$Dist_1 = R_{eff} - \sqrt{x_0^2 + (R_3 L_c + y_0)^2}.$$

Для последнего кристалла в строке R_3 рассчитывается расстояние от верхнего правого угла до края окружности

$$Dist_2 = R_{eff} - \sqrt{(x_0 + C_3 W_c)^2 + (R_3 L_c + y_0)^2}.$$

Шаг 4. Вычисление числа кристаллов в области 5 ($CPW5$). $CPW5$ можно посчитать через произведение R_5 на число кристаллов C_3 , расположенных между направляющими L_1 и L_2 :

$$CPW5 = R_5 C_3, \quad (7)$$

где $R_5 = \left[\left(\sqrt{R_{eff}^2 - x_0^2} + y_0 \right) / L_c \right]$.

Для первого кристалла в строке R_5 рассчитывается расстояние от нижнего левого угла до края окружности

$$Dist_3 = R_{eff} - \sqrt{x_0^2 + (R_5 L_c - y_0)^2}.$$

Для последнего кристалла в строке R_5 рассчитывается расстояние от нижнего правого угла до края окружности

$$Dist_4 = R_{eff} - \sqrt{(x_0 + C_3 W_c)^2 + (R_5 L_c - y_0)^2}.$$

Шаг 5. Вычисление числа кристаллов в области 1 ($CPW1$). Для всех строк от $R_3 + 1$ производится последовательная проверка условия

попадания каждого кристалла в пределы окружности. В ходе проверки ведется подсчет кристаллов, целиком расположенных в окружности. Для каждой строки организованы два встречных процесса – от первого кристалла до среднего (mid) и от последнего (C_3) по средний ($mid - 1$). В первом процессе для кристаллов проверяется условие, что расстояние от центра пластины до верхнего левого угла кристалла больше R_{eff} :

$$\sqrt{((R_3 + i)L_c + y_0)^2 + ((j - 1)W_c + x_0)^2} > R_{eff}, \quad (8)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, j = 1 \dots mid$.

При невыполнении данного условия процесс останавливается. Кристалл с номером j , на котором не выполнилось условие (8), – первый в строке i , попавший в окружность.

Во втором процессе для кристаллов проверяется условие, что расстояние от центра пластины до верхнего правого угла кристалла больше R_{eff}

$$\sqrt{((R_3 + i)L_c + y_0)^2 + (kW_c + x_0)^2} > R_{eff}, \quad (9)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, k = C_3 \dots mid - 1$.

При невыполнении данного условия процесс останавливается. Кристалл с номером k , на котором не выполнилось условие (9), – последний в строке i , входящий в окружность.

Для первого и последнего кристаллов, попавших целиком в окружность, вычисляются расстояния от контролируемых углов до края окружности $Dist_i, i = 4, 5, 6, \dots$

Общее число кристаллов в текущей строке, которые попадают в окружность, $(k - j + 1)$ прибавляется к $CPW1$. Проверка по строкам заканчивается, если $k - j + 1 = 0$. Анализ условий (8) и (9) позволяет отказаться от полного перебора всех кристаллов в строке, что снижает вычислительные и временные затраты при решении на ЭВМ.

Шаг 6. Вычисление числа кристаллов в области 6 ($CPW6$). Данный шаг реализуется аналогично шагу 5, но для всех строк от $R_5 + 1$. В первом процессе для кристаллов проверяется условие, что расстояние от центра пластины до нижнего левого угла кристалла больше R_{eff}

$$\sqrt{((R_3 + i)L_c - y_0)^2 + ((j - 1)W_c + x_0)^2} > R_{eff}, \quad (10)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, j = 1 \dots mid$.

При невыполнении данного условия процесс останавливается. Кристалл с номером j , на котором не выполнилось условие (10), – первый в строке i , попавший в окружность.

Во втором процессе для кристаллов проверяется условие, что расстояние от центра пла-

стины до верхнего правого угла кристалла больше R_{eff}

$$\sqrt{((R_3 + i)L_c - y_0)^2 + (kW_c + x_0)^2} > R_{eff}, \quad (11)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, k = C_3 \dots mid - 1$.

При невыполнении данного условия процесс останавливается. Кристалл с номером k , на котором не выполнилось условие (11), – последний в строке i , входящий в окружность. Для первого и последнего кристаллов, попавших целиком в окружность, вычисляются расстояния от контролируемых углов до края окружности $Dist_i$.

Общее число кристаллов в текущей строке, которые попадают в окружность, $(k - j + 1)$ прибавляется к CPW_6 . Проверка по строкам заканчивается, если $k - j + 1 = 0$.

Шаг 7. Вычисление числа кристаллов в области 2 (CPW_2). Последовательно для всех столбцов, которые находятся левее направляющей L_1 , производится проверка условия попадания кристаллов в пределы окружности. В столбцах над направляющей L_5 кристаллы рассматриваются по убывающей от строки R_3 до 1. Для них проверяется условие, что расстояние от центра пластины до верхнего левого угла кристалла больше R_{eff}

$$\sqrt{(iL_c + y_0)^2 + (jW_c + x_0)^2} > R_{eff}, \quad (12)$$

где $i = R_3 \dots 1, j = 1, 2, 3, \dots$

При невыполнении условия (12) кристалл в столбце j с номером i и все кристаллы, расположенные под ним до L_5 , входят в окружность. К CPW_2 прибавляется i .

В столбцах под направляющей L_5 кристаллы рассматриваются по убывающей от строки R_5 до 1. Для них проверяется условие, что расстояние от центра пластины до нижнего левого угла кристалла больше R_{eff}

$$\sqrt{(lL_c - y_0)^2 + (jW_c + x_0)^2} > R_{eff}, \quad (13)$$

где $l = R_5 \dots 1, j = 1, 2, 3, \dots$

При невыполнении условия (13) кристалл в столбце j с номером l и все кристаллы, расположенные над ним до L_5 , входят в окружность. К CPW_2 прибавляется l . Для кристаллов с номерами i и l вычисляются расстояния от контролируемых углов до края окружности $Dist_i$. Если $i = 0$ и $l = 0$, то процесс проверки по столбцам завершается.

Шаг 8. Вычисление числа кристаллов в области 4 (CPW_4). Последовательно для всех столбцов, которые находятся правее направляющей L_2 , производится проверка условия попадания кристаллов в пределы окружности аналогично шагу 7. В столбцах над направляющей L_5 кристаллы рассматриваются по убывающей от строки R_3 до 1. Для них проверяется условие (12). В столбцах под направляющей L_5 кристаллы рассматриваются по убывающей от строки R_5 до 1. Для них проверяется условие (13). К CPW_4 прибавляются i и l . Если $i = 0$ и $l = 0$, то шаг 8 завершается.

Шаг 9. Подсчет числа CPW и суммарного фактора удаленности кристаллов от края окружности. Количество кристаллов на пластине равно сумме CPW_i , полученных для шести областей

$$CPW = \sum_{i=1}^6 CPW_i.$$

Для повышения качества литографического процесса и снижения вероятности появления дефектов важно расположить кристаллы максимально близко к центру пластины, т.е. обеспечить максимальную равноудаленность кристаллов от края окружности. Количественно данный показатель рассчитывается как среднегеометрическое расстояний от контролируемых углов крайних кристаллов до края окружности

$$MSD = \sqrt{\sum_{m=1}^M Dist_m},$$

где M – общее число крайних кристаллов.

Шаг 10. Поиск оптимального расположения кристаллов. В двойном вложенном цикле обеспечивается смещение опорной точки, а следовательно, и направляющих, по осям X и Y . В силу симметричности смещение по оси X определено в диапазоне от 0 до W_c , а по оси Y – от 0 до L_c . Шаг приращений по осям задается числом итераций. В цикле по X происходит синхронное смещение направляющих L_1 и L_2 на величину приращения Δx вправо, а в цикле по Y – синхронное смещение направляющих $L_3 - L_5$ на Δy вверх. Для каждой новой позиции опорной точки повторяются шаги 3–9.

Критерий оптимального расположения прямоугольных кристаллов в окружности кремниевой пластины – минимум параметра MSD среди решений, обеспечивающих максимум CPW , т.е. $\{\max(CPW); \min(MSD)\}$.

Работа алгоритма завершается при выходе из цикла. Результаты – координаты опорной точки (x'_0, y'_0) , соответствующей оптимальному решению во множестве выполненных итераций, и количество кристаллов CPW .

2. Экспериментальная часть

Предложенный алгоритм был реализован в виде пакета прикладных программ в среде математических расчетов MATLAB. Апробация алгоритма выполнялась на наборе ИС с различными геометрическими размерами, которые необходимо разместить на кремниевых пластинах диаметром восемь и двенадцать дюймов (200 мм и 300 мм соответственно). Для пластин ширина запрещенной области по границе была установлена 25 мм. В каждом эксперименте количество итераций составило 10 000 шагов (100 точек по каждой координате).

Сравнение результатов работы предложенного алгоритма проводилось с результатами алгоритма из [5], в котором опорный кристалл располагают строго по центру пластины и относительно него размещают остальные кристаллы. Данный алгоритм получил наибольшее распространение при производстве ИС на восьмидюймовых кремниевых пластинах. Сводные результаты проведенных экспериментов представлены в табл. 1 и 2. Все расчеты выполнялись на ПК с процессором Intel Pentium 4 с тактовой частотой 2.4 ГГц. Среднее время расчета для 10 000 итераций составило 4–5 секунд.

Следует отметить, что предложенный алгоритм обеспечивает увеличение количества кристаллов ИС, которые можно разместить на пластине, в среднем на 1–2 %. Такой показатель улучшает экономические показатели процесса производства интегральных схем, особенно в случае больших партий. При этом повышается коэффициент использования кремниевой пластины и обеспечивается условие максимального приближения границ кристаллов к центру пластины (т.е. максимальное удаление от запрещенной области по границе).

Заключение

Использование предложенного алгоритма на этапе формирования масок фотошаблонов требует минимальных временных затрат, обеспечивая возможность повысить количество реализуемых на каждой кремниевой пластине кристаллов ИС. Заложенный в алгоритме механизм виртуального разделения пластины на шесть областей позволяет решать задачу параллельно, используя вычислительные мощности многоядерных процессоров. Реализация алгоритма в виде многопоточкового приложения обеспечит снижение общего времени вычисления.

Развитие предложенной работы автор видит в реализации подсистемы САПР, решающей комплексную задачу планирования топологии заказных интегральных схем на этапе их проектирования.

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований для пластины $D_w = 200$ мм

Длина L_c , мм	Ширина W_c , мм	Площадь, мм ²	CPW_A , шт.	CPW_B , шт.	Увеличение, %
4.98	11.64	57.97	468.00	461.00	1.52
9.13	10.22	93.31	286.00	283.00	1.06
9.13	5.76	52.59	520.00	513.00	1.36
11.28	12.50	141.00	184.00	179.00	2.79
6.79	7.61	51.67	530.00	523.00	1.34
7.38	4.92	36.31	766.00	755.00	1.46

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований для пластины $D_w = 300$ мм

Длина L_c , мм	Ширина W_c , мм	Площадь, мм ²	CPW_A , шт.	CPW_B , шт.	Увеличение, %
4.98	11.64	57.97	1105.00	1099.00	0.55
9.13	10.22	93.31	679.00	669.00	1.49
9.13	5.76	52.59	1226.00	1213.00	1.07
11.28	12.50	141.00	441.00	439.00	0.46
6.79	7.61	51.67	1250.00	1235.00	1.21
7.38	4.92	36.31	1791.00	1789.00	0.11

Примечание: CPW_A – количество кристаллов на пластине для предложенного алгоритма, CPW_B – количество кристаллов на пластине, получаемое по алгоритму из [5].

Список литературы

1. De Vries D. K. Investigation of gross die per wafer formulas // IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing. 2005. V. 18, No. 1. P. 136–139.
2. Wang L.-T., Stroud C.E., Touba N.A. System-on-chip test architecture: nanometer design for testability. Morgan Kaufman Publishers, Elsevier, 2008. 856 p.
3. Ferris-Prabhu A.V. An algebraic expression to count the number of chips on a wafer // IEEE Circuits Devices Magazine. 1989. V. 5. P. 37–39.
4. Chien C.-F., Hsu S., Chen C. An iterative cutting procedure for determining the optimal wafer exposure pattern // IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing. 1999. VI. 12, No. 3. P. 375–377.
5. Imai Y. Shot map preparing method // Published patent application, 09-027445, 1997.
6. Chien C.-F., Hsu S.-C., Deng J.-F. A cutting algorithm for optimizing the wafer exposure pattern // IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing. 2001. V. 14, No. 2. P. 157–162.

AN ALGORITHM OF DIE PLACEMENT ON A SILICON WAFER*S.G. Mosin*

An iterative algorithm of IC die optimal placement on a silicon wafer has been proposed. Selection criteria for the optimal solution have been defined. Algorithm performance results for some experiments have been presented. A comparison with one of the existing solution methods has been made. An estimation of the proposed algorithm has been given.

Keywords: integrated circuit (IC), dies, optimal placement.