

Оптимизация регулярной сетки питания СБИС

А.А. Поминова

НИИ системных исследований РАН, Anna.Pominova@gmail.com

Аннотация — С увеличением сложности микросхем и продолжением масштабирования технологии проблема разработки надежной сети земли/питания с обеспечением требуемых ресурсов для трассировки сигнальных линий стала ключевой для гарантии надежности и производительности СБИС. В данной статье предложен метод оптимизации регулярной сетки питания, который позволяет на 16% снизить падение напряжения, при сохранении общей площади сети земли/питания на кристалле.

Ключевые слова — сеть земли/питания, сетка питания, оптимизация, СБИС.

I. ВВЕДЕНИЕ

Надежная сеть земли/питания – один из ключевых элементов, гарантирующих требуемую производительность и надежную работу современных СБИС. С увеличением частоты и плотности элементов флуктуации напряжения в сетях земли/питания на кристалле становятся всё более значительными. Вместе с тем ограничения по максимально допустимому падению напряжения с масштабированием технологии становятся всё более жесткими. Флуктуации напряжения в сетях земли/питания обусловлены следующими факторами: падением напряжения на резистивной составляющей сопротивления трасс земли/питания (так называемый IR drop), индуктивной составляющей (Ldi/dt) или LC – резонансом [2]. Прямой путь снижения падения напряжения – расширение трасс сети земли/питания, что увеличивает трудности при трассировке сигнальных линий, и, в свою очередь, снижает производительность. Ключевым при построении сети земли/питания является компромисс между падением напряжения и площадью трасс земли/питания на кристалле.

Наиболее распространенной в современных СБИС топологией сети земли и питания является регулярная сетка [3]. Как следствие, проблема поиска оптимальных параметров регулярной сетки питания хорошо изучена. Авторы [4] делают сетку в верхних слоях металла нерегулярной, делят её на квадратные подсетки, или плитки, в которых при помощи специального оптимизатора изменяют количество трасс, в соответствии с потреблением в данном секторе. Показано, что такой подход

позволяет сократить до 23% площади сетки питания, не увеличивая падения напряжения. Аналитическое решение для расчета ширины трасс земли/питания, при которой сопротивление сетки в выбранном слое будет минимальным, представлено в [5]. Данный подход был расширен для поиска оптимальных, с точки зрения падения напряжения, параметров многослойной сети земли/питания в [6].

Проблема сокращения площади сетки питания при постоянном падении напряжения решается авторами [7] путем преобразования основных ограничений задачи нелинейного программирования в последовательность задач линейного программирования, что делает метод, при прочих равных, более быстрым, чем известный метод сопряженных градиентов [8]. Авторами [9] были получены аналитические выражения, позволяющие оптимизировать двухслойную сетку питания с целью снизить падение напряжения, не увеличивая площадь, либо с целью снизить площадь, не увеличивая падения напряжения, на ранней стадии разработки микросхемы.

Целью исследований данной статьи является оптимизация сети земли/питания с топологией регулярной сетки, с контактными площадками wire-bond, расположенными по периметру кристалла. Применительно к данной задаче особенно интересным представляется метод, изложенный в [1]. Он позволяет при сохранении общей площади сети земли/питания на кристалле значительно снизить падение напряжения (вплоть до 33 %). Однако авторы применяют его к сеткам размером не более чем 33x33 трассы (1089 узлов). Реализация данного метода на сетках в сотни тысяч узлов (сетки питания высокопроизводительных систем, например СнК) является чрезвычайно затратной по временным и машинным ресурсам. В данной статье метод был адаптирован для регулярных сеток питания большой размерности и реализован для сетки питания микропроцессора, сделанного по технологии 0,18 мкм КМОП.

II. МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ

Метод применяется к сетке питания в двух верхних слоях металла. Вся сетка питания может быть разделена на радиальные и тангенциальные составляющие (рис. 1).

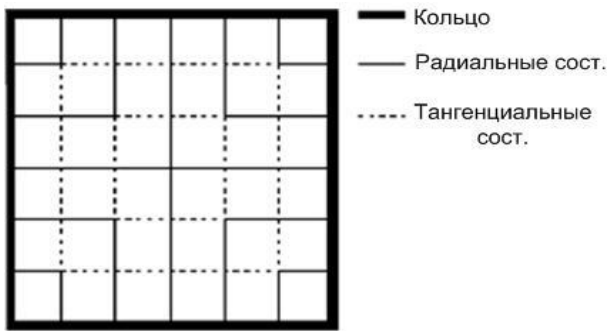


Рис. 1. Разделение сетки питания на радиальные и тангенциальные составляющие

На рис. 2 приведена зависимость падения напряжения в центре кристалла от проводимости тангенциальных и радиальных составляющих [1]. Видно, что через тангенциальные составляющие почти не протекает ток, поэтому общее падение напряжения на кристалле очень мало зависит от проводимости тангенциальных составляющих.

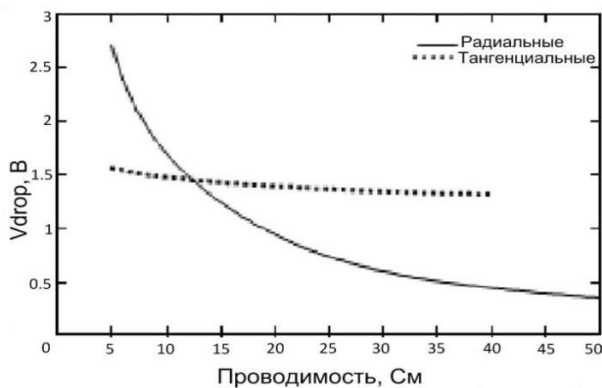


Рис. 2. Зависимость пикового падения напряжения от проводимости радиальных и тангенциальных составляющих

Таким образом, на падение напряжения влияют главным образом радиальные составляющие сетки питания. Следовательно, снижение сопротивления радиальных составляющих за счет увеличения на ту же величину сопротивления тангенциальных составляющих позволит снизить падение напряжения на всей сетке и, в то же время, не спровоцирует увеличения суммарной площади трасс земли/питания, а значит, не создаст дополнительных трудностей при трассировке сигнальных линий. В [1] предлагается изменять сопротивление радиальных и тангенциальных составляющих на одну и ту же величину в пределах одного эквипотенциального кольца (рис. 3). Количество эквипотенциальных колец равно $(n - 1)/2$, где n – размерность сетки питания. Размерность сетки питания современного микропроцессора, по меньшей мере, 500x500 трасс [2]; таким образом, требуется рассчитать значения сопротивлений для тангенциальных и радиальных составляющих в пределах каждого из 250-ти эквипотенциальных колец. Затем данные значения корректируются с

учетом изменения формы эквипотенциальных колец (от квадратной на периферии до круглой в центре).

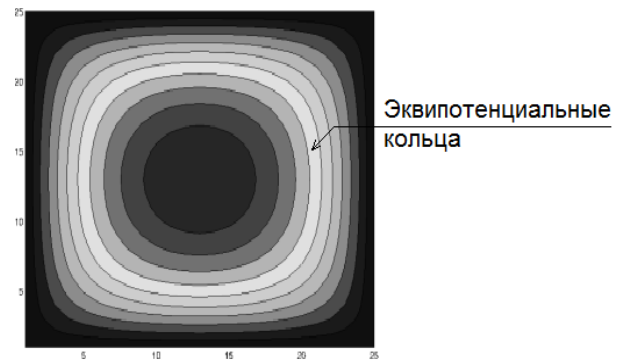


Рис. 3. Пример распределения напряжений на регулярной сетке питания размерностью 25 x 25 при равномерно распределенном потреблении

После чего вносятся поправки, связанные с неравномерным распределением потребления на кристалле. В результате авторами было получено снижение падения напряжения на 30%. Выполнение данных операций требует больших затрат временных и машинных ресурсов, поэтому в данной статье метод был упрощен до вида, максимально удобного в реализации. Основная идея сохраняется, однако предлагается изменять сопротивление радиальных и тангенциальных составляющих равномерно на всем кристалле. Данный метод гораздо проще в реализации и, как показали результаты моделирования, также весьма эффективен.

III. РЕАЛИЗАЦИЯ

Данный подход был применен для оптимизации сетки питания высокопроизводительного микропроцессора, выполненного по технологии 0,18 мкм КМОП в шести металлах. Сетка питания была трассирована в первом, четвертом и двух верхних металлах, размерность в верхнем металле - 570x570 трасс. В соответствии с исходным методом модифицируются только два верхних слоя металлов. Фрагмент исходной сетки в двух верхних слоях металлов представлен на рис. 4.

Для реализации метода была написана универсальная программа, формирующая скрипт для нанесения сетки питания необходимого рисунка на кристалл заданных размеров. Программа рассчитывает координаты трасс заданной ширины (радиальных и тангенциальных составляющих, соответственно) и вставляет их в шаблон команды Cadence EDI 9.13, создавая скрипт.

Изменение сопротивления пропорционально изменению ширины трассы. Поэтому можно перенести расчеты с сопротивлений трасс на их ширины.

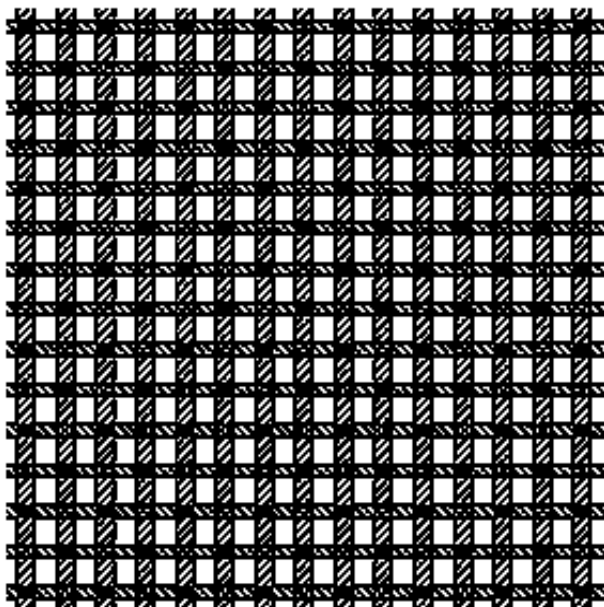


Рис. 4. Фрагмент исходной сетки питания в двух верхних слоях металлов

Расчет ширины радиальных и тангенциальных составляющих проводится следующим образом:

$$w_T = w_{иск} * (1 - \alpha),$$

$$w_P = w_{иск} * (1 + \alpha),$$

где w_T и w_P - ширины тангенциальных и радиальных составляющих, соответственно, $w_{иск}$ - ширина трассы в исходной сетке питания, α - величина, на которую было решено изменить ширины трасс, в долях.

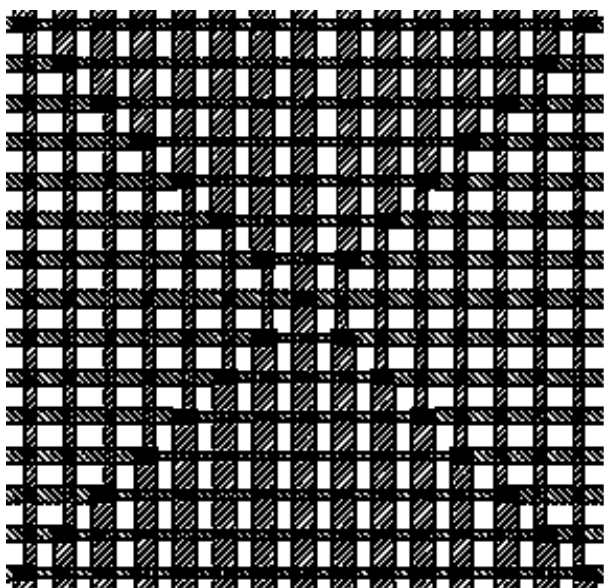


Рис. 5. Фрагмент полученной сетки питания в двух верхних слоях металлов

Расчеты проводились с использованием значений α , равных 10, 20, 30 и 40 %.

Выбор величины α зависит от проекта и ограничен требованиями технологических норм (максимальная и минимальная ширина трасс, величина зазоров и проч.). Также величина α для каждого слоя металла ограничена требованиями трассировки сигнальных линий в вертикальном и горизонтальном направлениях, соответственно. При увеличении α неизбежно наступает момент, когда трассировка сигнальных линий становится невозможной, даже при наличии места в горизонтальном направлении, из-за потребности в вертикальной трассировке.

Структура полученной сетки изображена на рис. 5.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Так как в данном методе учитывается только резистивная составляющая сопротивления сети питания, для оценки эффективности оптимизации использовался статический анализ в САПР Cadence Encounter Power System 9.13. Был проведен анализ четырех проектов, в которых оптимизация сетки питания была проведена с параметром α , равным 10, 20, 30 и 40 процентам, соответственно. В таблице 1 приводится сравнение результатов анализа проекта до оптимизации с результатами анализов проектов после оптимизации.

Таблица 1

Падение напряжения и общая проводимость до и после оптимизации

	$\alpha = 10$ %	$\alpha = 20$ %	$\alpha = 30$ %	$\alpha = 40$ %
Vdrop до оптимизации, В	0,131	0,131	0,131	0,131
Гобщ до оптимизации, мСм	11029	11029	11029	11029
Гобщ после оптимизации, мСм	10357	11060	10490	11030
Vdrop после оптимизации, В	0,12	0,11	0,10	0,093
Снижение Vdrop, %	8,1	16	24	29

Как видно из таблицы, проводимость сетки питания в результате оптимизации изменяется незначительно, тогда как падение напряжения на сетке заметно уменьшается с ростом коэффициента α . Однако при коэффициентах α , равных 30 и 40 процентам, возникли трудности при трассировке сигнальных линий в вертикальном направлении, в связи с чем было принято решение использовать для оптимизации параметр $\alpha = 20$ %.

Распределение падения напряжения на кристалле до и после оптимизации с параметром $\alpha = 20\%$ по результатам статического анализа в САПР приведено на рис. 6 и 7, соответственно.

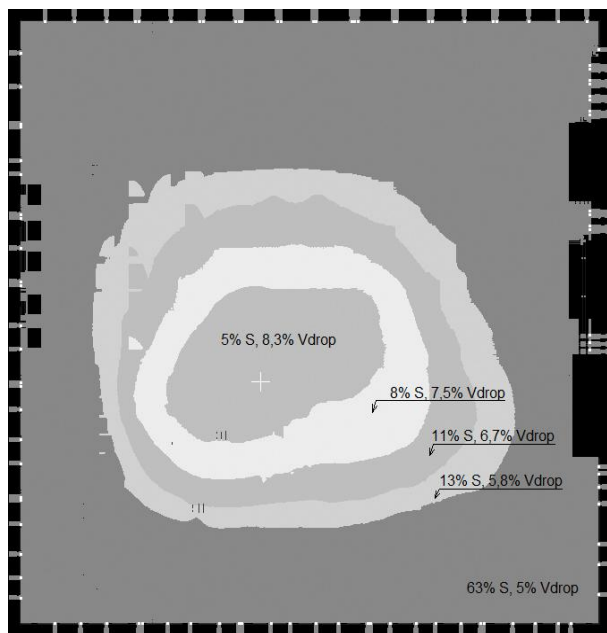


Рис. 6. Падение напряжения на кристалле без оптимизации сетки питания, S – площадь кристалла

При сравнении рис. 6 и 7 видно, что помимо величины максимального падения напряжения, также сокращается и площадь на кристалле, на которой имеет место это наибольшее падение напряжения.

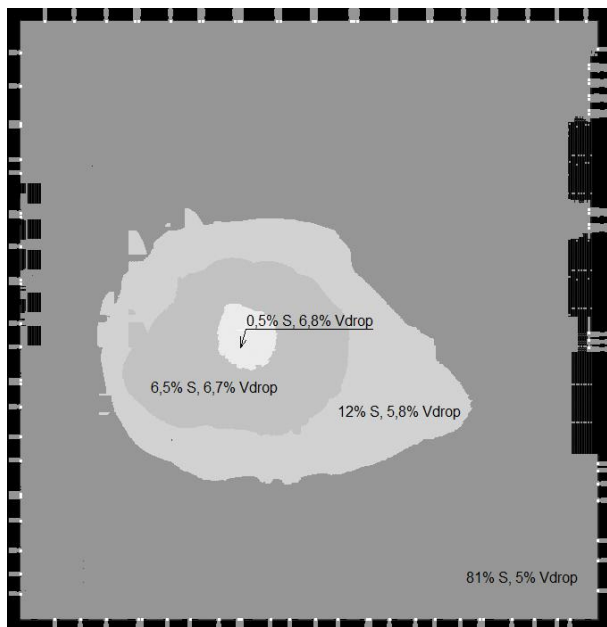


Рис. 7. Падение напряжения на кристалле после оптимизации с параметром $\alpha = 20\%$, S – площадь кристалла

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье предложен метод оптимизации регулярной сетки питания, который позволяет на 16% снизить падение напряжения при сохранении общей площади сети земли/питания на кристалле. Для оптимизации выбирается максимальное значение параметра α , при котором не возникает трудностей с трассировкой сигнальных линий. Для реализации подхода была написана универсальная программа, формирующая скрипт для нанесения сетки питания необходимого рисунка на кристалл заданных размеров. Эффективность метода доказана на примере сети распределения земли/питания высокопроизводительного микропроцессора, выполненного по технологии 0,18 мкм КМОП.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Puneet Gupta, Andrew B. Kahng Efficient Design and Analysis of Robust Power Distribution Meshes // Proceedings of the 19th International Conference on VLSI Design. - 2006. - P. 337-342.
- [2] S. Lin and N. Chang Challenges in Power-Ground Integrity // Proceedings of IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design, - 2001. - P. 651-654.
- [3] A. Dharchoudhury, R. Panda, D. Blaauw and R. Vaidyanathan Design and Analysis of Power Distribution Networks in PowerPC Microprocessors // Proc. IEEE/ACM Design Automation Conference. - 1998. - P. 738-743.
- [4] Jaskirat Singh, Sachin S. Sapatnekar Congestion-Aware Topology Optimization of Structured Power/Ground Networks // IEEE Transactions On Computer-Aided Design Of Integrated Circuits And Systems. - 2005. - V. 24. - № 5. - P. 683-695.
- [5] Renatas Jakushokas, Eby G. Friedman Line Width Optimization for Interdigitated Power/Ground Networks // Proceedings of the 20th ACM Great Lakes Symposium on VLSI 2009. - 2010. - P. 329-334.
- [6] Renatas Jakushokas, Eby G. Friedman Multi-Layer Interdigitated Power Distribution Networks // IEEE Transactions On Very Large Scale Integration Systems. - 2006. - V. 19. - № 5. - P. 774-786.
- [7] Sheldon X.-D. Tan, C.-J. Richard Shi, Jyh-Chwen Lee Reliability-Constrained Area Optimization of VLSI Power/Ground Networks Via Sequence of Linear Programmings // IEEE Transactions On Computer-Aided Design of Integrated Circuits And Systems. - 2003. - V. 22. - № 12. - P. 1678-1684.
- [8] Chowdhury S. Optimum design of reliable IC power networks having general graph topologies // Proc. 26th ACM/IEEE Design Automation Conf. - 1989. - P. 787-790.
- [9] Hongyu Chen, Chung-Kuan Cheng, Andrew B. Kahng, Makoto Mori, Qinke Wang Optimal Planning for Mesh-Based Power Distribution // Proceedings of the ASP-DAC. - 2004. - P. 444-449.