

Приложение Б. ЭФФЕКТЫ ЗАДЕРЖКИ В ТЕХНОЛОГИИ ГЛУБОКОГО СУБМИКРОНА

Введение

При проектировании систем, основанных на использовании заказных микросхем (ASIC) или специализированных стандартных блоков (ASSP), расчет необходимых временных параметров и эффектов представляет собой довольно сложную задачу. С появлением каждого нового уровня технологического процесса анализ временных эффектов становится всё более устрашающим. С некоторого момента, значение которого точно не определено (или разными людьми определяется по-разному), но находится на уровне примерно 0.5-микронного (500 нанометров) технологического процесса, мы погружаемся в область, которой свойственны так называемые *эффекты задержки глубокого субмикрона*.

Конечно же, что касается ПЛИС, то их разработчики решают множество проблем, связанных с проявлением этих задержек, тем самым, скрывая их от конечного пользователя (то есть от проектировщика устройств на основе ПЛИС). Основываясь на этом, можно сказать, что у нас нет необходимости обсуждать эти явления в контексте ПЛИС. С другой стороны, разговоры об этих задержках ведутся постоянно, но я ни разу не встречал их полного и понятного любому человеку описания. Именно поэтому ниже следующее описание представлено здесь для вашего удовольствия и наслаждения.

Развитие спецификаций задержки

Давным-давно, в былые времена, где-то после Юрского периода, когда Землю населяли динозавры — скажем, в конце 1970-х или начале 1980-х годов — жизнь инженеров, разрабатывающих системы на основе заказных специализированных микросхем, была куда проще, чем у наших современников. Спецификация задержек для ранних (мультимикронных) технологий была элементарной во всех отношениях. Давайте рассмотрим простой 2-входовый вентиль И, для которого задержка прохождения данных от входа до выхода изначально была одинаковой для фронтов и спадов поступающих на вход импульсов (Рис. Б.1, а).

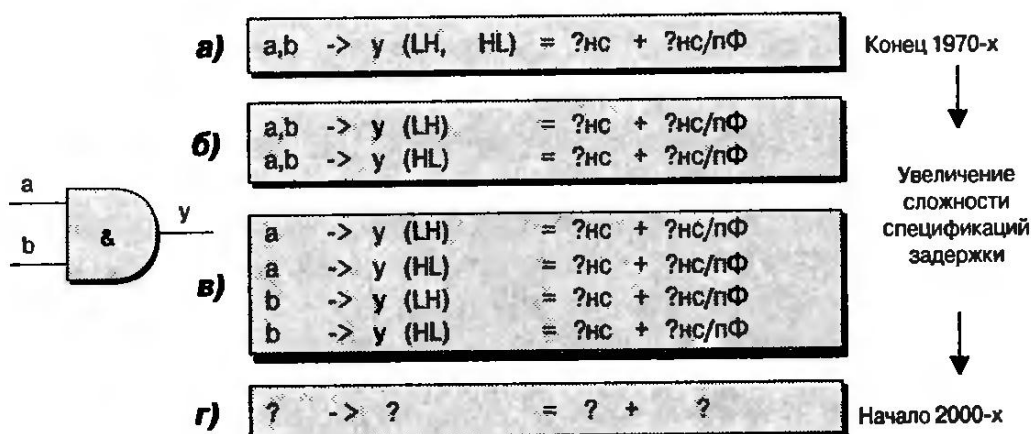


Рис. Б.1. Увеличение сложности спецификации задержек с течением времени

Содержимое этого приложения взято из моей книги «Designus Maximus Unleashed» (ISBN 0-7506-9089-5) с любезного разрешения издателя.

1975 г. Разработан микропроцессор 6502 с использованием МОП-технологии.

Однако уменьшение геометрических размеров устройств сопровождалось увеличением сложности спецификаций задержек. На следующем этапе задержки стали различаться для фронтов (возрастание сигнала) и спадов (спад сигнала) поступающих импульсов (Рис. Б.1, б), а затем появилось отличие в задержках для разных входов элементов (Рис. Б.1, в).

В прежние времена задержки обычно описывались в виде записи $t_{нс} + t_{нс}/n\Phi$. В этом представлении первая часть ($t_{нс}$) отображает фиксированную задержку в наносекундах¹⁾ для всего логического элемента. К ней добавляется некоторая дополнительная задержка, измеряемая в наносекундах на пикофарад ёмкости нагрузки²⁾ ($t_{нс}/n\Phi$). Разумеется, эта форма записи просто не может описывать явления задержки в субмикронных технологиях, хотя бы вследствие того, что в этой области, как будет показано ниже, задержка определяется RLC-параметрами.

Набор определений

Перед тем, как с головой погрузиться в пучину субмикронных задержек, сначала необходимо рассмотреть ряд определений, которые представлены ниже.

Крутизна импульса

Крутизна (или наклон) импульса представляет собой скорость изменения сигнала при его переходе с уровня логического 0 на уровень логической 1 и наоборот. При мгновенном переходе, который не может быть достигнут в реальном мире, обеспечивается максимально возможное значение крутизны (Рис. Б.2).

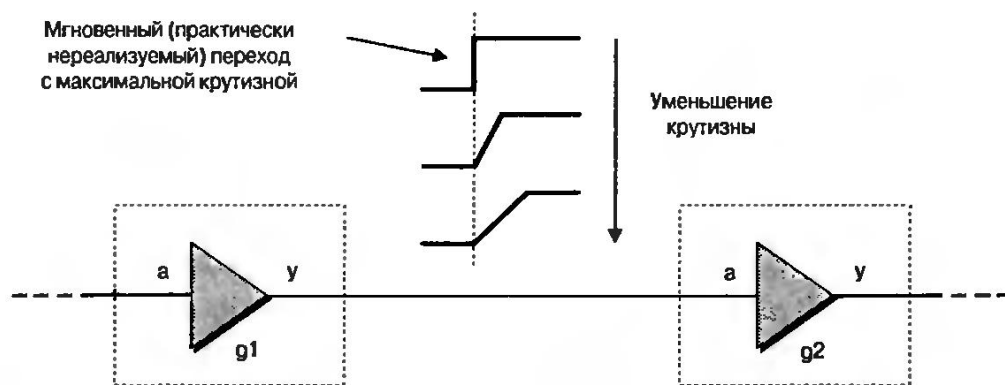


Рис. Б.2. Крутизна сигнала характеризует время, необходимое для перехода сигнала с уровня на уровень

Крутизна импульса представляет собой одну из выходных характеристик источника сигнала совместно с параметрами внутренних соединений (проводников) и входных характеристик нагрузки (вентилей).

¹⁾ Современные устройства работают намного быстрее, их задержка может измеряться в пикосекундах.

²⁾ Основной единицей измерения ёмкости служит Фарада в честь британского учёного Майкла Фарадея (Michael Faraday), который в 1821 году сконструировал первый электромотор.

Входной порог срабатывания

Порог срабатывания представляет собой точку на входной характеристике нагрузки (то есть логического элемента — вентиля), и характеризует собой уровень напряжения, пересечение которого входным сигналом будет означать, что на входе элемента логическое состояние сменилось на противоположное. Входной порог срабатывания обычно описывается в процентах от величины разности напряжений между уровнями логического 0 и логической 1, и каждый вход может иметь различные пороги срабатывания для фронтов и спадов (Рис. Б.3).

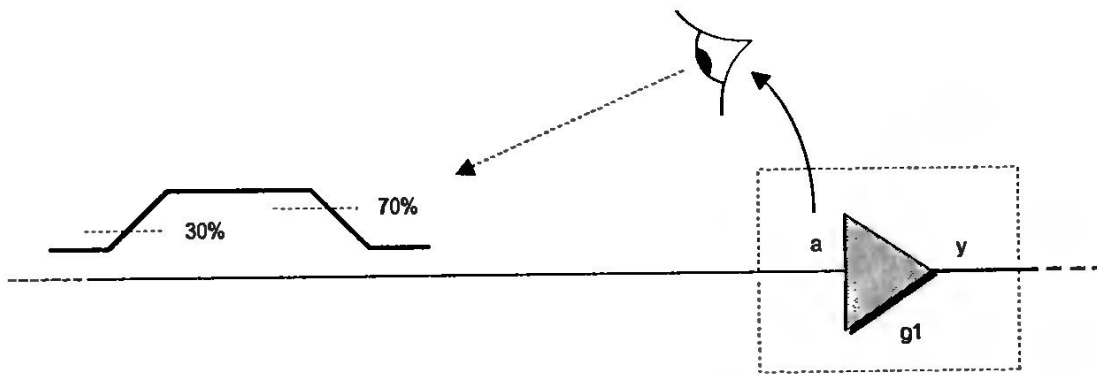


Рис. Б.3. Входной порог срабатывания может иметь различные значения для фронтов и спадов

Внутренние и внешние задержки

Внутренними называют задержки, которые свойственны внутренней архитектуре логических функций, соответственно внешние задержки относятся к внутренним (межблочным) соединениям (Рис. Б.4).

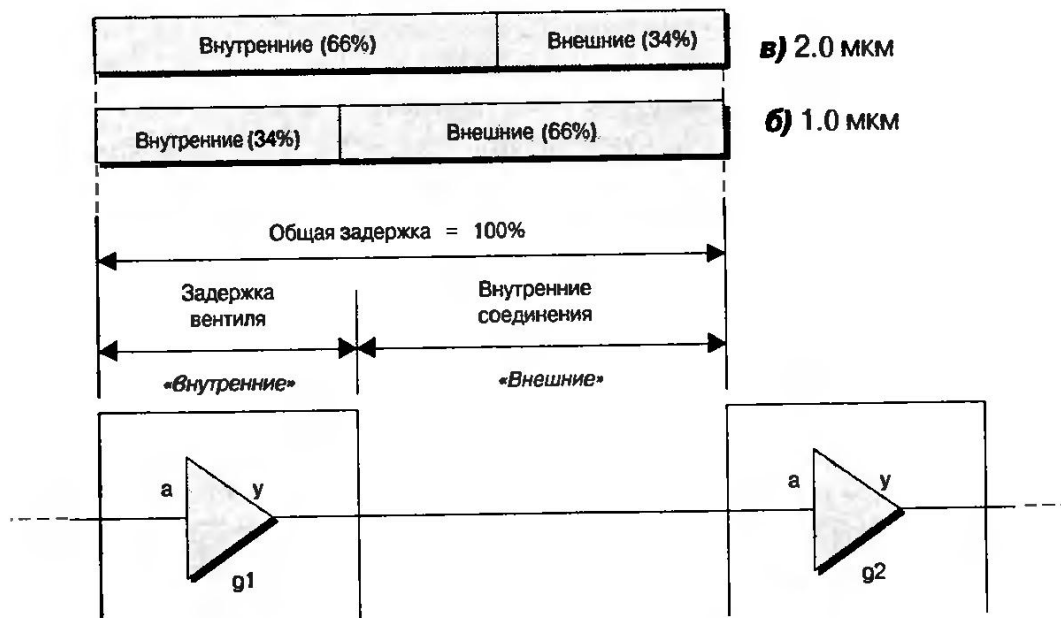


Рис. Б.4. Внутренние и внешние задержки

Во времена ранних мультимикронных технологий внутренние задержки преобладали над внешними. Например, в 2-микронной технологии внутренние задержки составляли величину порядка двух третей от общей задержки (Рис. Б.4, а). Но с уменьшением геометрических размеров элементов микросхем внешняя задержка стала расти. Так в 1-микронной технологии соотношение внутренних и внешних задержек изменилось с точностью до наоборот (Рис. Б.4, б).

1975 г. Америка.
Компания Microsoft
разработала язык
Basic 2.0 для мик-
рокомпьютера
Altair 8800.

1976 г. Америка.
Компания Zilog
разработала микропроцессор Z80.

1976 г. Стив Возняк (Steve Wozniak) и Стив Джобс (Steve Jobs) разработали микрокомпьютер Apple I на базе процессора 6502.

Со временем тенденция роста доли внешних задержек сохраняется, так как размеры внутренних соединений уменьшаются медленнее, чем размеры вентиля и транзисторов. В современных глубоко-субмикронных технологиях доля внешних задержек может составлять 80 процентов и более от величины общей задержки.

Задержки вывод-вывод и точка-точка

По большому счёту задержки типа *вывод-вывод* ($Pn-Pn$ — *pin-to-pin*) и *точка-точка* ($Pt-Pt$ — *point-to-point*) являются современными названиями внутренних и внешних задержек соответственно. Задержка *вывод-вывод* характеризует собой время от прихода воздействия на вход вентиля до появления соответствующей реакции на его выходе, а *точка-точка* описывает время распространения сигнала между выходом источника сигнала и входом нагрузки¹⁾ (Рис. Б.5).

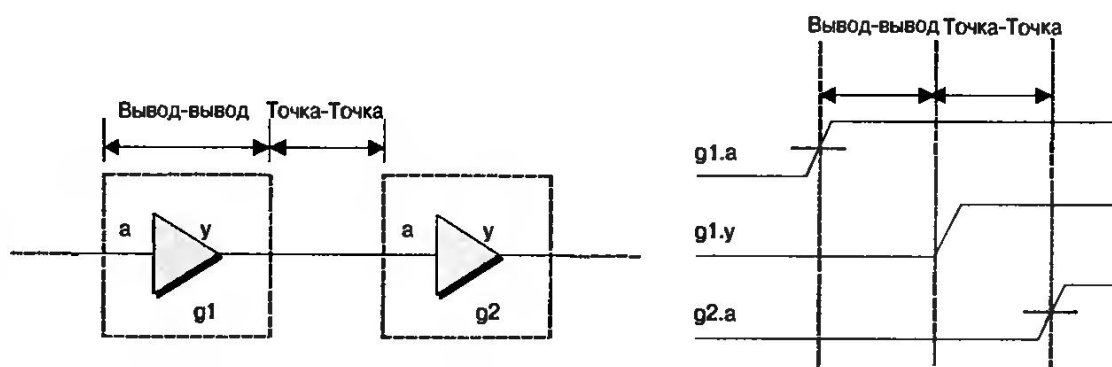


Рис. Б.5. Задержки вывод-вывод и точка-точка

Если быть более точным, то задержка *вывод-вывод* равна времени от момента достижения входным сигналом порога срабатывания до *начала* соответствующей реакции на выходе вентиля, а задержка *точка-точка* определяется от *начала* соответствующей посылки источника сигнала до достижения ею порога срабатывания нагрузки.

Существует ряд причин, почему мы придаём особое значение тому факту, что в качестве завершающего отсчета для задержки вывод-вывод мы берём *начало* отклика, так же как задержку точка-точка отсчитываем от *начала* посылки источника сигнала. В прошлом эти задержки отсчитывались от времени, когда сигнал достигал уровня 50% от разницы между 0 и 1. Такой подход был допустим, так как считалось, что порог срабатывания у вентиля также составляет 50%. Но в связи со значительным увеличением крутизны импульсов предположим, что входной порог срабатывания снизился до 30%. Если в этом случае мы будем полагать, что задержка измеряется от уровня 50 процентов, то вполне вероятно, что вентиль нагрузки увидит фронт (или спад) импульса до того, как мы будем ожидать его появления. Также при моделировании смешанных (аналоговых и цифровых) сигналов достоверное время прохождения фронта (или спада) импульса от выхода вентиля в цифровой части к аналоговым компонентам определяется по точке, в которой и начинается формироваться фронт импульса на выходе вентиля.

¹⁾ Следует заметить, что разработчики печатных плат обычно не анализируют внутреннюю структуру электронных компонентов, и обычно рассматривают их как «чёрные ящики». А упомянули мы об этом потому, что под термином «точка-точка» эти разработчики могут подразумевать время распространения сигнала между двумя точками на плате.

Зависимость от состояния и зависимость от крутизны

Все параметры, связанные с входом вентиля (включая задержку вывод-вывод), которые зависят от логических значений на других входах этого элемента, называются *зависимыми от состояния*. Аналогично, все параметры, связанные с входом вентиля (включая задержку вывод-вывод), которые зависят от крутизны поступающих на их входы импульсов, называются *зависимыми от крутизны*. Эти определения пока не оказывают существенного влияния на работу устройств, хотя в недалёком будущем они могут проявить себя по-другому.

Альтернативные модели внутренних соединений

С уменьшением размеров структур на кремниевом кристалле и увеличением количества вентилях в устройстве, задержки на внутренних соединениях стали более существенными, чем на вентилях, что привело к увеличению сложности алгоритмов, необходимых для их точного описания. Кратко эти алгоритмы рассмотрены ниже.

Модель с сосредоточенной нагрузкой

Как отмечалось выше, задержка на вентилях вида вывод-вывод в первых мультимикронных технологиях доминировали над задержками вида точка-точка. К тому же, длительность фронтов и спадов сигнала обычно была больше, чем время, необходимое для их прохождения через внутренние соединения. В этом случае для описания внутренних соединений обычно было достаточно так называемой модели внутренних соединений с сосредоточенной нагрузкой (Рис. Б.6).

1977 г. Америка.
Компания Apple раз-
работала микро-
компьютер Apple II.

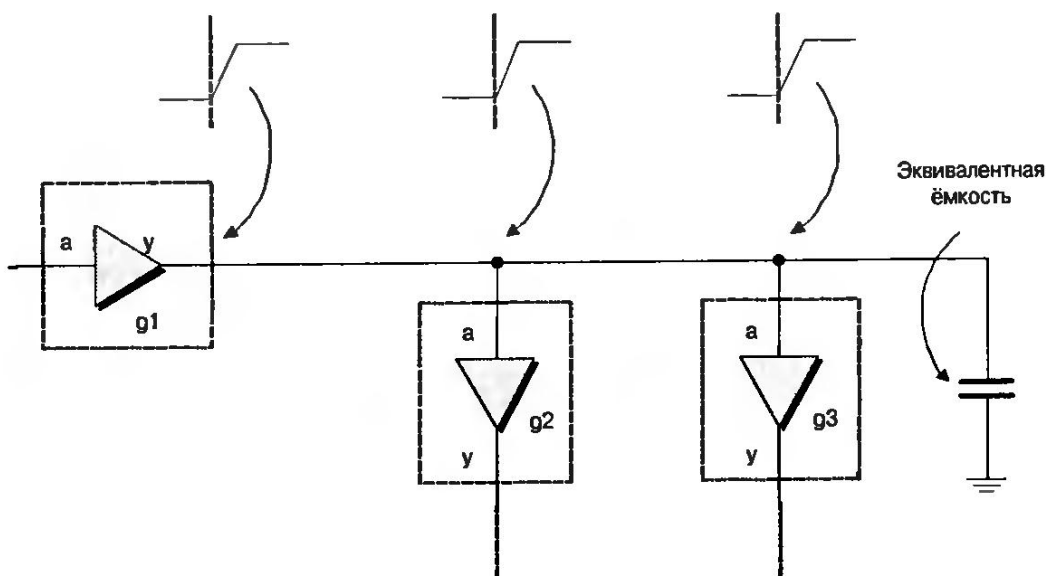


Рис. Б.6. Модель внутренних соединений с сосредоточенной нагрузкой

Идея этой модели состоит в том, что все ёмкости, связанные с проводниками и входами вентиля, объединяют вместе и образуют один *эквивалентный конденсатор*. Ёмкость этого конденсатора затем умножалась на параметр вентиля (источника сигнала), который обычно выражался в нс/пФ для получения значения задержки точка-точка. Модель с сосредоточенной нагрузкой отличается тем, что все узлы на проводнике начинают передачу в одно и то же время и с одинаковой крутизной импульса. Эта модель также может называться *чистой RC-моделью*.

1977 г. Америка.
Компания
Commodore Business
Machines разрабо-
тала микроком-
пьютер Commodore
PET на базе микро-
процессора 6502.

Распределённая RC-модель

Уменьшение размеров электронных устройств в середине 1980-х годов вызвало потребность в более точном описании внутренних соединений, чем это позволяла сделать модель с сосредоточенной нагрузкой. Вследствие этого появилась распределённая RC-модель (Рис. Б.7).

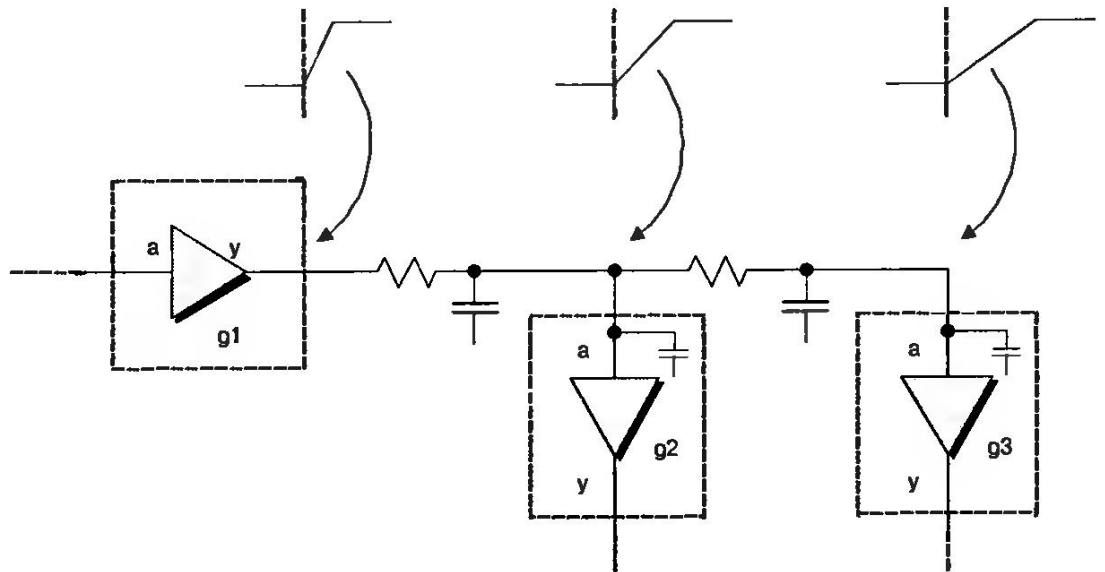


Рис. Б.7. Распределённая RC-модель внутренних соединений

В распределённой RC-модели каждый сегмент проводника рассматривается в виде RC-цепочки. Эта модель характеризуется тем, что все узлы проводника начинают передачу одновременно, но с разной крутизной импульсов. Если быть более точным, то крутизна импульса уменьшается по мере его прохождения через проводник.

Чистая LC-модель

Высокоскоростные внутренние соединения на уровне печатной платы по своим параметрам приближаются к линиям передачи. В этом случае чистая LC-модель (где буквы L и C представляют соответственно индуктивность и ёмкость) может быть представлена в виде прямоугольного (почти мгновенного) перехода с уровня на уровень, распространяющегося через проводник (Рис. Б.8).

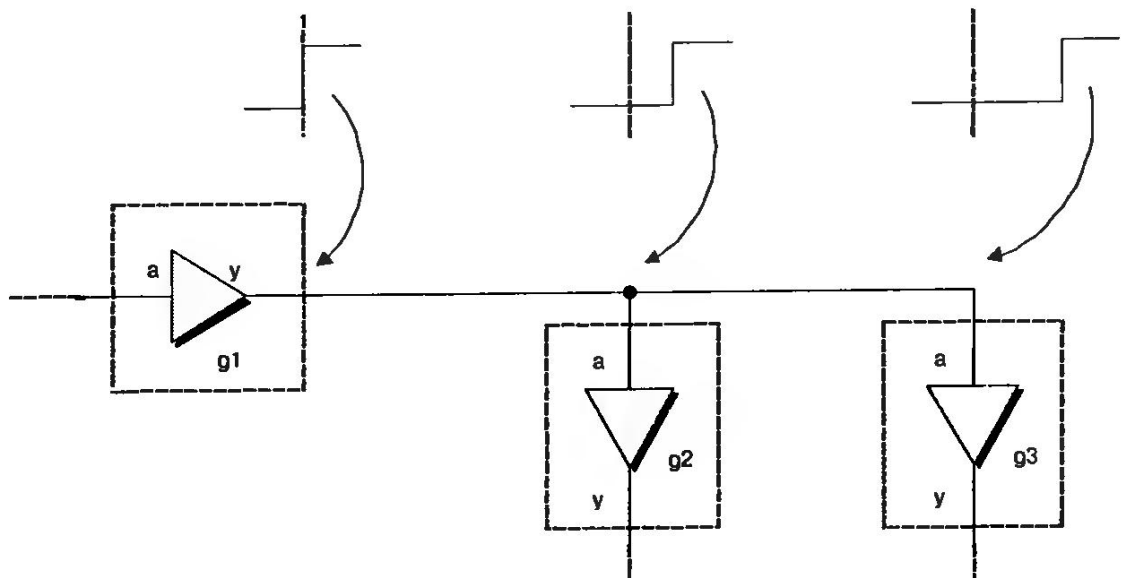


Рис. Б.8. Чистая LC-модель внутренних соединений

Эффекты, свойственные линии передачи, не проявляют себя на уровне кремниевого кристалла, но в больших субмикронных устройствах, как будет показано ниже, задержки этого типа уже начинают играть значимую роль.

RLC-модель

В больших устройствах, изготовленных по технологии глубокого субмикрона, скорость передачи сигналов и относительно длинные дорожки приводят к возникновению некоторых эффектов, характерных для линий передач. Однако резистивная природа внутрикристалльных соединений не подвержена чистым LC-эффектам. Поэтому внутренние проводники таких микросхем могут быть описаны с помощью RLC-модели (Рис. Б.9).

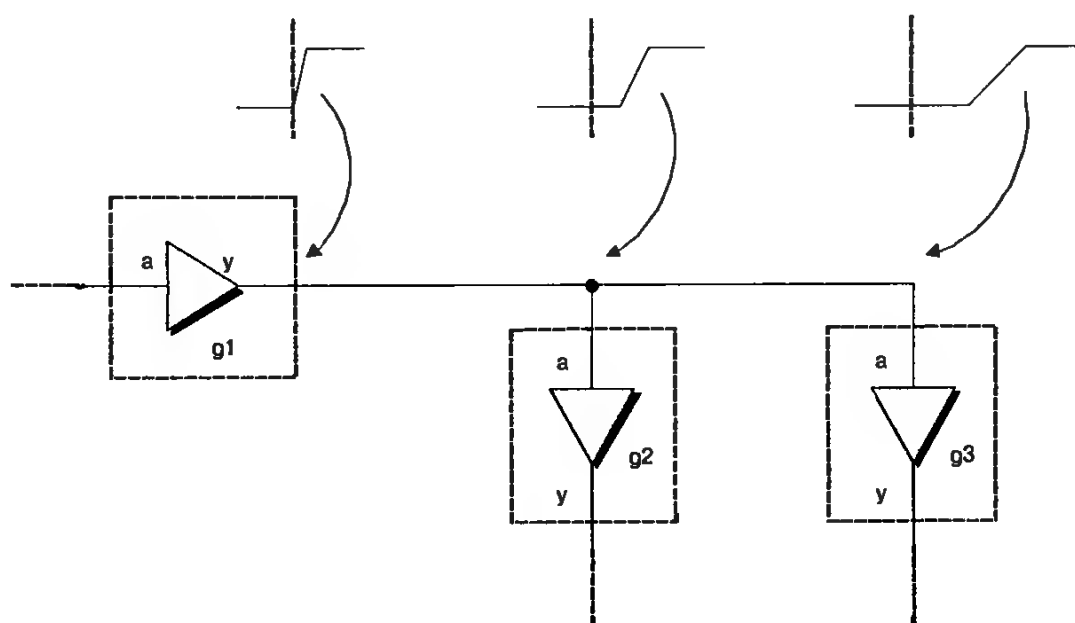


Рис. Б.9. RLC-модель внутренних соединений

RLC-модель характеризуется комбинацией сдвига фронта импульса при его распространении через проводник, вызванного LC-компонентами линии передачи, а также значительным уменьшением крутизны фронта передаваемого импульса из-за RC-составляющей внутренних соединений.

Эффекты задержки глубокого субмикрона

Зависимость задержки вывод-вывод от пути прохождения сигнала

В современных цифровых микросхемах каждый путь прохождения сигнала от входа до выхода характеризуется своим значением задержки вывод-вывод. Например, в 2-входовом логическом вентиле ИЛИ изменение сигнала на входе *a* вызовет изменение сигнала на выходе *y* (Рис. Б.10, а), причем значение задержки в этом случае может отличаться от того, которое будет при изменении сигнала на входе *b* (Рис. Б.10, б).

1977 г. Америка.
Компания
Tandy/Radio Shack
разработала мик-
рокомпьютер TRS-
80 на базе процес-
сора Z80.

1977 г. Одна из телефонных компаний впервые применила в своей работе оптический волновод.

1978 г. Компания Apple впервые применила жесткие диски в персональных компьютерах.

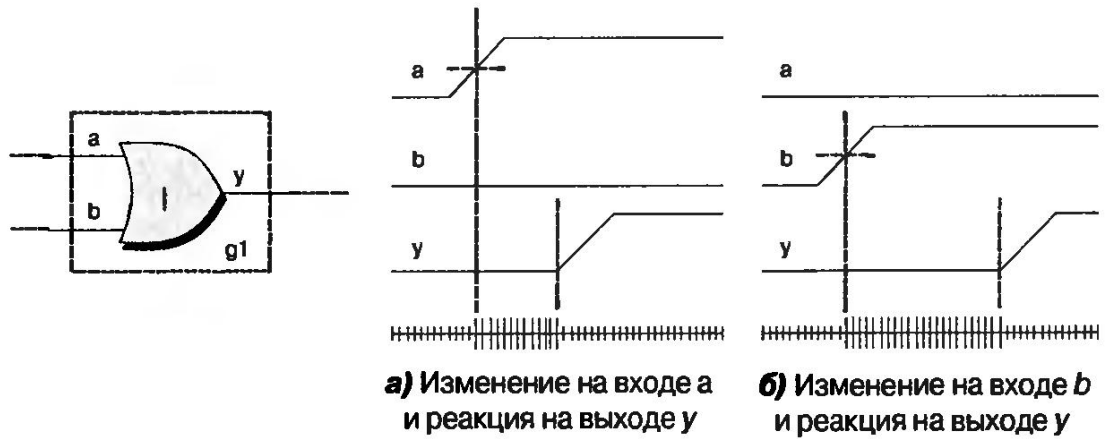


Рис. Б.10. Зависимость задержки вывод-вывод от пути прохождения сигнала

Величина задержки вывод-вывод также будет зависеть от вида поступившего на логический элемент сигнала. Например, в нашем логическом элементе ИЛИ поступающий на вход *a* фронт (нарастающий фронт) импульса будет вызывать на выходе *y* задержку отличную от той, которая возникает при поступлении на этот же вход спада (ниспадающий фронт) импульса.

Заметим, что в этом простом примере порог срабатывания на входе равен 50 процентам, и, как уже говорилось выше, время задержки измеряется от момента, когда входное воздействие пересекает порог срабатывания, и до того, как сигнал на выходе начнёт изменять своё значение.

Следует заметить, что технология глубокого субмикрона не ограничивается только зависимостью задержки вывод-вывод от пути прохождения сигнала и типа входного воздействия (фронта или спада импульса), и представлены они здесь для того, чтобы подготовить вас к предстоящим ужасам.

Зависимость задержки вывод-вывод от порога срабатывания

В цифровых устройствах задержка вывод-вывод зависит от величины порога срабатывания каждого входа. Объяснить эту зависимость можно хотя бы тем, что значение задержки начинает отсчитываться только после того, как входной сигнал достигнет уровня порога срабатывания. Например, если входной порог срабатывания входа *a* для фронта импульса установлен на уровне 30% от разницы между логическим 0 и логической 1 (Рис. Б.11, а), то реакция на выходе этого логического элемента появится раньше, чем при пороге на уровне 70% (Рис. Б.11, б).

Кроме того, крутизна поступающих на вход импульсов также влияет на время, за которое сигнал достигает уровня порога срабатывания. Чтобы понять этот процесс, давайте представим себе, что у входа *a* порог срабатывания установлен на уровне 50 процентов. В этом случае сигнал с высокой крутизной импульсов, поступающих на этот вход (Рис. Б.12, а), спровоцирует реакцию на выходе логического элемента раньше, чем сигнал с более пологим фронтом (Рис. Б.12, б).

Хотя эта зависимость определяет время начала отсчёта задержки вывод-вывод, это всё же НЕ зависимость задержки вывод-вывод от крутизны фронта сигнала, рассматриваемой в следующем подразделе.

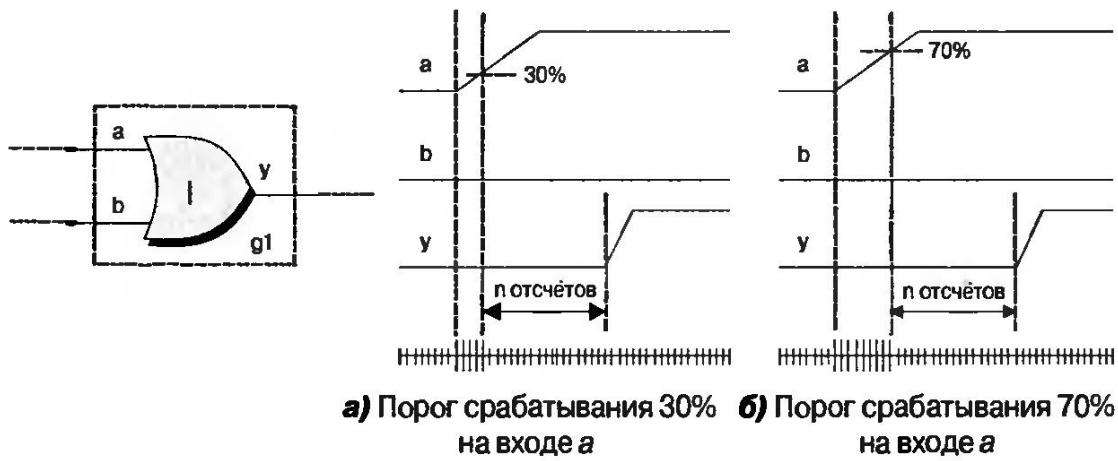


Рис. Б.11. Зависимость задержки вывод-вывод от порога срабатывания

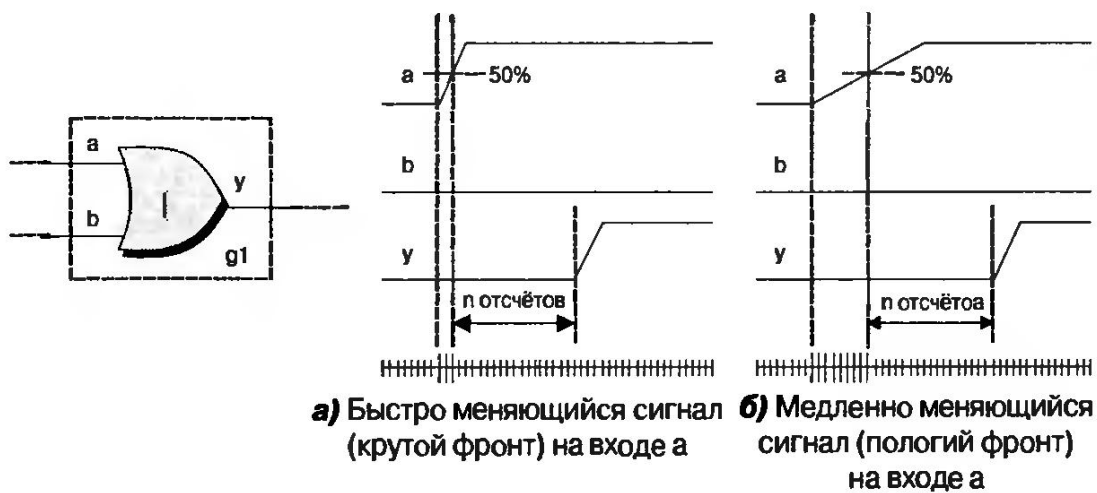


Рис. Б.12. Крутизна фронта входного сигнала влияет на время реакции логического элемента

Зависимость задержки вывод-вывод от крутизны фронта входного сигнала

Рассмотренный выше пример был отчасти упрощенным, так как длительность двух рассмотренных задержек вывод-вывод была одинаковой и не изменялась при разной крутизне поступающих сигналов. Некоторые производители САПР всё же называют такой случай «зависимостью от крутизны», однако это определение не совсем корректно. На самом деле, в технологиях глубокого субмикрона величина задержки может быть действительно зависимой от крутизны, то есть её длительность может напрямую меняться с изменением крутизны входного сигнала.

Давайте посмотрим, что произойдёт с сигналом при его прохождении через входной порог срабатывания вентиля. Значение задержки вывод-вывод, отсчитываемое от этого порога может быть функцией от скорости изменения входного сигнала. Например, быстро меняющийся входной сигнал может привести к меньшей задержке вывод-вывод (**Рис. Б.13, а**), чем сигнал с низким значением крутизны (**Рис. Б.13, б**).

В действительности зависимость, показанная на **Рис. Б.13**, при которой уменьшение крутизны фронта сигнала приводит к увеличению задержки, на самом деле является только одним из всех возможных сценариев. Данный конкретный случай применим к вентилям, реали-

1979 г. Разработан язык программирования Ада, названный по имени Ады Августы Лавлейс (Lady Ada Augusta Lovelace). Леди Ада считается первым программистом. (Леди Ада Лавлейс — дочь известного поэта Байрона, работала ассистенткой математика Чарльза Байбиджа (Charles Babbage). — Прим. пер.)

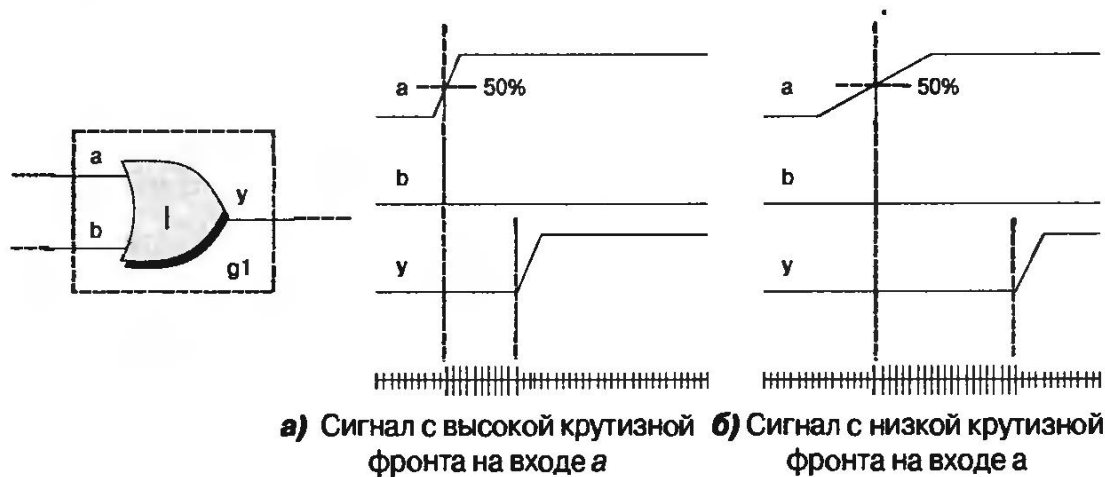


Рис. Б.13. Зависимость величины задержки вывод-вывод от крутизны фронта входного сигнала

зованным таким образом, что, скорость переключения транзисторов, формирующих вентили, напрямую зависит от скорости изменения заряда, приложенного к их входам. При использовании других технологических решений при реализации вентилях уменьшение крутизны сигнала на входах приведёт к сокращению задержки вывод-вывод (длительность которой измеряется от достижения порога срабатывания до начала изменения сигнала на выходе). Последнее объяснить можно тем, что медленно меняющийся сигнал на входе позволяет внутренним транзисторам предварительно накапливать заряды до достижения сигналом порога срабатывания. Когда входной сигнал пересечёт этот порог, вентиль будет уже предварительно подготовлен к началу работы и произведёт переключение своего выходного сигнала через меньшее время, чем при изменении сигнала с большей крутизной.

Исключительно для поднятия вашего настроения и ради вашего удовольствия хочу добавить, что оба рассмотренных эффекта могут протекать одновременно. В этом случае импульсу с чрезвычайно высокой крутизной фронта (или спада) на входе может соответствовать некоторое значение задержки вывод-вывод. С уменьшением крутизны входных импульсов эта задержка будет постепенно увеличиваться, и с какого то определённого значения крутизны снова начнёт уменьшаться, возможно, даже до меньшего значения, которое соответствовало импульсу с максимально возможно высокой крутизной!¹⁾

Зависимость задержки вывод-вывод от состояния вентиля

Кроме крутизны входного сигнала, величина задержки вывод-вывод часто зависит от состояния логического элемента, то есть от логических значений, находящихся на других входах рассматриваемого элемента (Рис. Б.14).

В этом примере показаны два случая, когда сигналу на входе *a* соответствует один и тот же отклик (в логическом представлении) на выходе *co*. Однако если допустить, что входные сигналы имеют одинаковое значение крутизны, а входы — одинаковый порог срабатывания, значение задержек вывод-вывод в этих случаях может отличаться из-за разных логических значений, представленных на входах *b* и *ci*.

¹⁾ А кое-кто говорит, что электроника — скучное и неинтересное занятие!

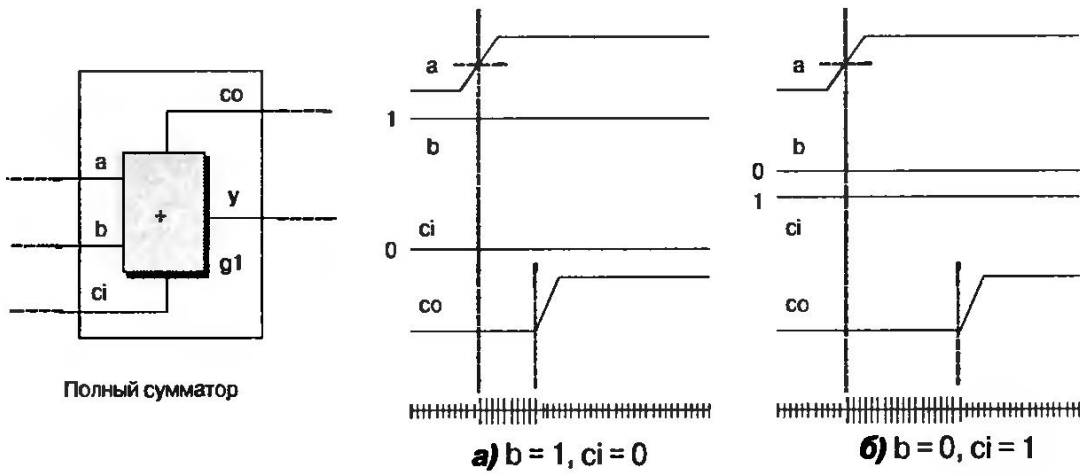


Рис. Б.14. Зависимость величины задержки вывод-вывод от состояния вентиля

Зависимость выходной характеристики от пути прохождения сигнала

Могу вас заверить, что с этого места ваша жизнь станет намного интересней (поверьте мне, разве я вас когда-нибудь обманывал?)¹⁾ До этого времени мы с вами рассматривали эффекты, которые влияют на величину задержки распространения сигнала через вентиль, (задержки вывод-вывод), но многие из этих эффектов также воздействуют на выходные характеристики сигнала, которые вентиль выдает на свой выход (или выходы). Например, выходная характеристика вентиля может зависеть от пути прохождения сигнала от входа до выхода (Рис. Б.15).

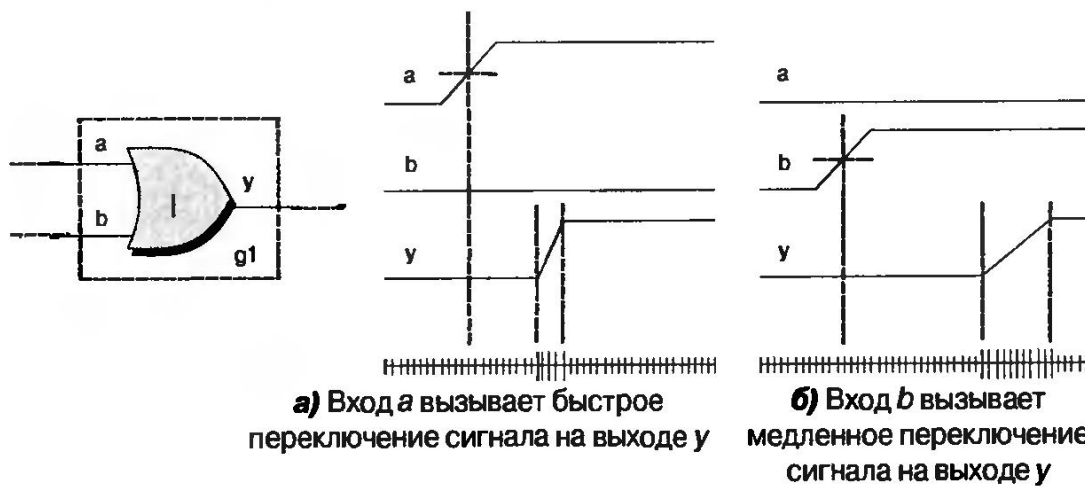


Рис. Б.15. Зависимость выходной характеристики вентиля от пути прохождения сигнала

В рассмотренном примере в дополнение к тому, что сигналам на входах a и b соответствуют разные значения задержек вывод-вывод, выходная характеристика вентиля (и, следовательно, крутизна выходного сигнала) также зависит от того, какой из входов вызвал изменение этого выходного сигнала. Изначально это явление было присуще МОП-технологиям и не проявлялось в логике на биполярных транзисторах, такой как ТТЛ. Однако с дальнейшим развитием технологий глубокого субмикрона многие из ранее скрытых эффектов задержки всё больше начали проявлять себя по-иному, пересекая принятые для них границы.

¹⁾ Можете не отвечать на этот вопрос.

1979 г. Америка. Появилась первая коммерческая программа *Visicalc spreadsheet* (электронные таблицы), написанная для микрокомпьютеров Apple II.

1980 г. Начало развития беспроводной и сотовой телефонии.

1980 г. Начало развития сети Интернет.

Зависимость выходной характеристики от крутизны входного сигнала

В дополнение к зависимости выходной характеристики вентиля от входа, который вызывает изменение выходного сигнала (как было показано в предыдущем разделе), эта характеристика (и крутизна выходного сигнала) также может зависеть от крутизны входных импульсов. Например, быстроменяющийся сигнал на входе *a* может вызвать быстроменяющийся отклик на выходе (Рис. Б.16, а), а фронт сигнала с малой крутизной может привести к появлению медленноменяющегося выходного сигнала (Рис. Б.16, б). Ну, как, вам ещё весело?

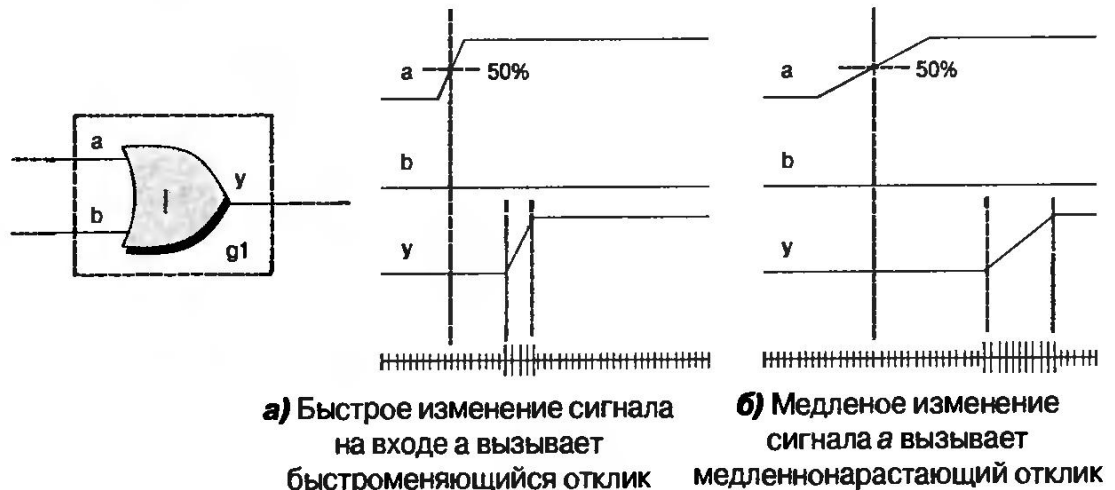


Рис. Б.16. Зависимость выходной характеристики вентиля от крутизны входного сигнала

Зависимость выходной характеристики вентиля от его состояния

Ещё одним фактором, оказывающим влияние на выходную характеристику вентиля, служат логические значения, присутствующие на его входах, но, в данный момент не вызывающие изменение выходного сигнала. Этот эффект называют зависимостью выходной характеристики вентиля от его состояния (Рис. Б.17).

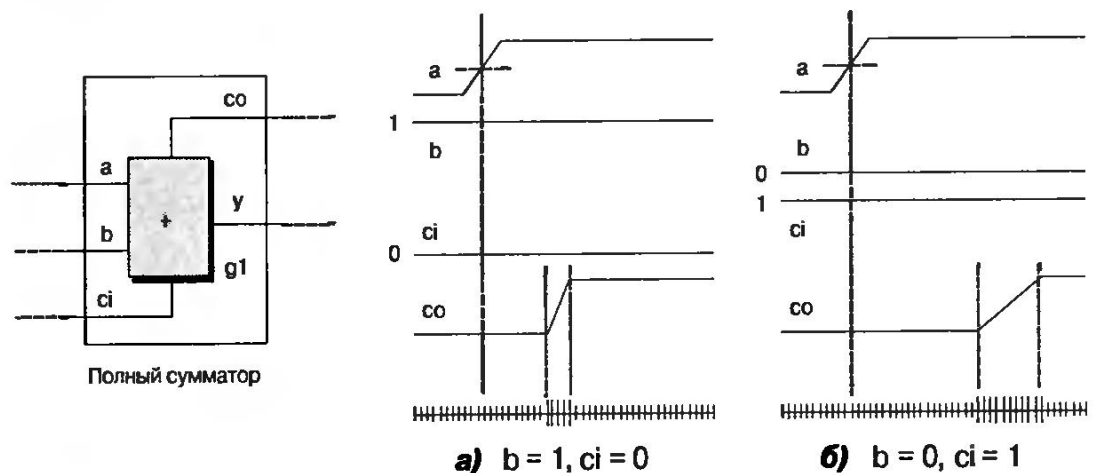


Рис. Б.17. Зависимость выходной характеристики вентиля от его состояния

На Рис. Б.17 приведены два случая, в которых сигнал на входе *a* вызывает идентичные логические отклики на выходе *co*. Однако если допустить, что входные сигналы имеют одинаковое значение крутизны, а сами входы — одинаковый порог переключения, то передаточная характеристика логического элемента и крутизна выходного сигнала может зависеть от логических уровней, поданных на входы *b* и *ci*.

Зависимость порога срабатывания вентиля от его состояния

Как вы уже заметили, при обсуждении зависимости выходной характеристики от состояния вентиля предполагалось, что порог срабатывания в рассматриваемых случаях находился на одном и том же уровне. Если это вас как-то насторожило, то этот подраздел поможет вам перенести все ужасы технологии глубокого субмикрона.

Смысл заключается в том, что по некоторым причинам входной порог срабатывания может зависеть от состояния вентиля. Другими словами, порог может изменяться в зависимости от логических значений, установленных на других входах (Рис. Б.18).

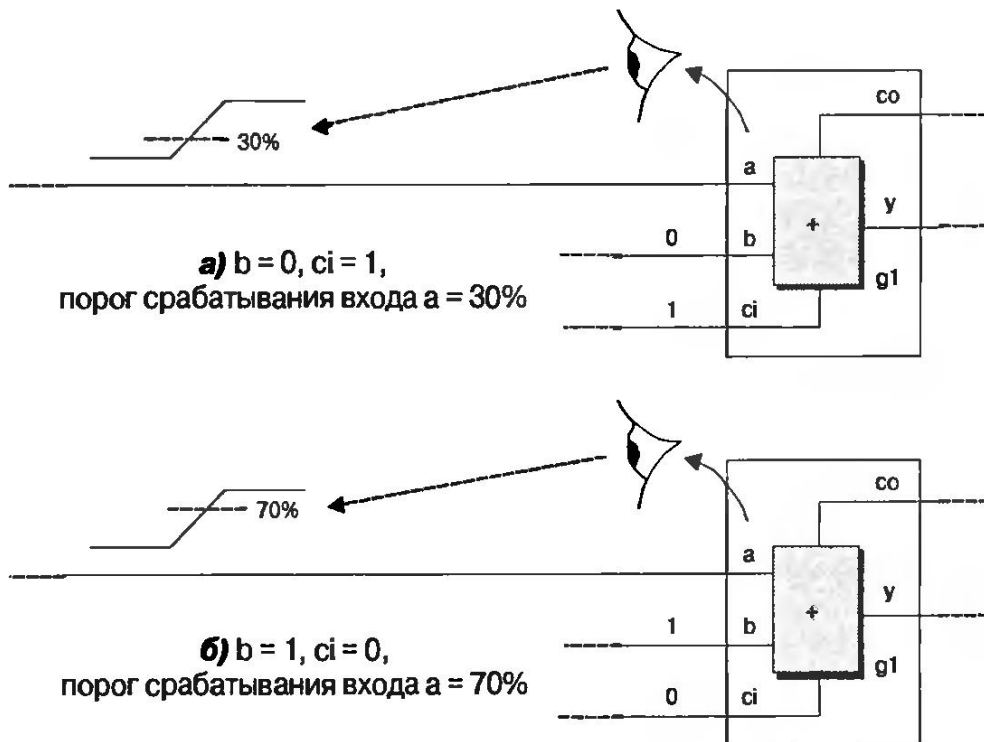


Рис. Б.18. Зависимость входного порога срабатывания вентиля от его состояния

В этом примере порог срабатывания входа a (точка, при пересечении которой входной сигнал вызывает изменение выхода элемента) зависит от логических состояний на входах b и ci .

Зависимость величины паразитных элементов вентиля от его состояния

Кроме зависимости входного порога срабатывания вентиля от его состояния, ряд характеристик, связанных с входами этого вентиля (таких как величина паразитных ёмкостей) также могут зависеть от логических уровней, находящихся на других входах. Например, рассмотрим 2-входовый вентиль ИЛИ (Рис. Б.19).

Ёмкость паразитного конденсатора на входе $g2.a$ (который подключен к выходу другого логического элемента $g1.y$) может зависеть от логического значения на входе $g2.b$. Если на входе $g2.b$ присутствует логический 0, то изменение сигнала на входе $g2.a$ вызовет изменение значения на выходе вентиля ИЛИ. В этом случае выход $g1.y$ (вход $g2.a$) столкнется с относительно большой паразитной ёмкостью. Однако если на вход $g2.b$ подать логическую 1, то изменение сигнала на входе $g2.a$ не вызовет переключения сигнала на выходе вентиля ИЛИ. При этом $g1.y$ столкнется с относительно небольшой ёмкостью.

1980 г. Осуществлена передача факса через обычную телефонную линию.

1981 г. Америка. Начато производство первых компьютеров IBM PC.

1981 г. Америка. Разработана первая компьютерная мышка.

1981 г. Разработан
первый ноутбук.

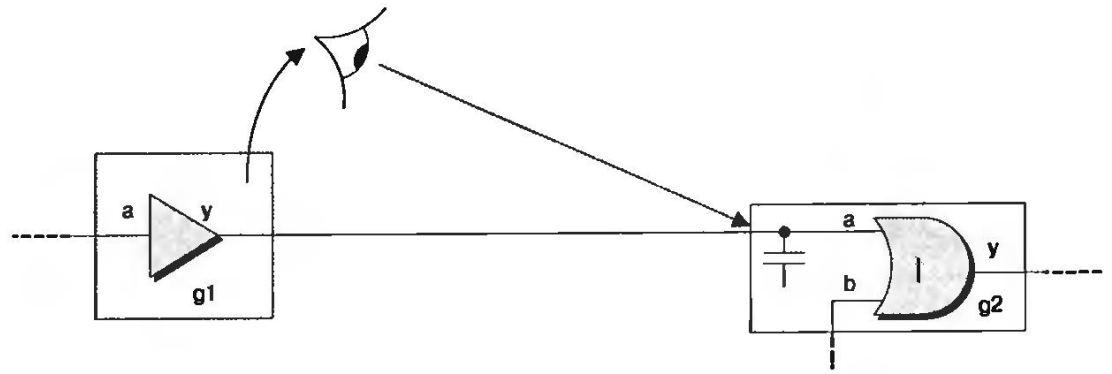


Рис. Б.19. Зависимость величины паразитных ёмкостей вентиля от его состояния

В этом случае можно спросить: «Если логический элемент ИЛИ не изменяет своё выходное значение, зачем нам беспокоиться о том, что паразитный конденсатор на входе a изменяет значение своей ёмкости? Разве мы не можем рассматривать только значение, проявляющееся при переключении выхода?» На самом деле всё было бы хорошо, если бы $g1.y$ был подключен только к входу $g2.a$, но проблема в том, что мы можем модифицировать схему, и в итоге $g1.y$ окажется подключен к входам других вентилях.

Этот эффект сначала проявлялся в устройствах эмиттерно-связанной логики (ЭСЛ). Ещё в конце 1980-х существовала одна ЭСЛ-технология, в которой паразитные конденсаторы на входах вентилях-приемников (с точки зрения выходов вентилях-передатчиков) изменяли свою ёмкость почти на 100 процентов в зависимости от состояния логических сигналов на других входах. Но это явление больше не ограничивается в своём проявлении только технологией ЭСЛ. Снова повторюсь, эффекты, вызывающие изменение значения задержки, начинают проявлять себя в новом качестве и выходят за пределы традиционных значений, когда мы продолжаем погружаться в область глубокого субмикрона.

Влияние изменения нескольких сигналов на задержку вывод-вывод

До этого времени мы с вами рассматривали случаи, в которых выходной сигнал изменял своё значение при изменении на входе только одного сигнала. Очевидно, что картина усложнится при анализе ситуаций, когда выходной сигнал формируется при изменении нескольких входных сигналов. Например, рассмотрим 2-входовый логический элемент ИЛИ (Рис. Б.20).

Для простоты примера, предположим, что оба входных сигнала на выводах a и b полностью одинаковы, так же как одинаковы для этих входов пороги срабатывания и задержки вывод-вывод.

Сначала рассмотрим случай, когда на одном из входов (к примеру, на a) меняется сигнал и тем самым вызывает изменение выходного сигнала (Рис. Б.20, а). В результате такого воздействия значение задержки будет соответствовать тому, которое обычно приводится в справочниках для рассматриваемой микросхемы. Однако если подать сигналы одновременно на оба входа, то значение задержки вывод-вывод может уменьшиться примерно до 50 процентов от значения, приведённого в справочнике.

Ситуации, когда входной сигнал подаётся на один вход или на оба входа подаются одновременно два сигнала, представляют собой два крайних случая. Однако также необходимо учитывать ситуации, когда

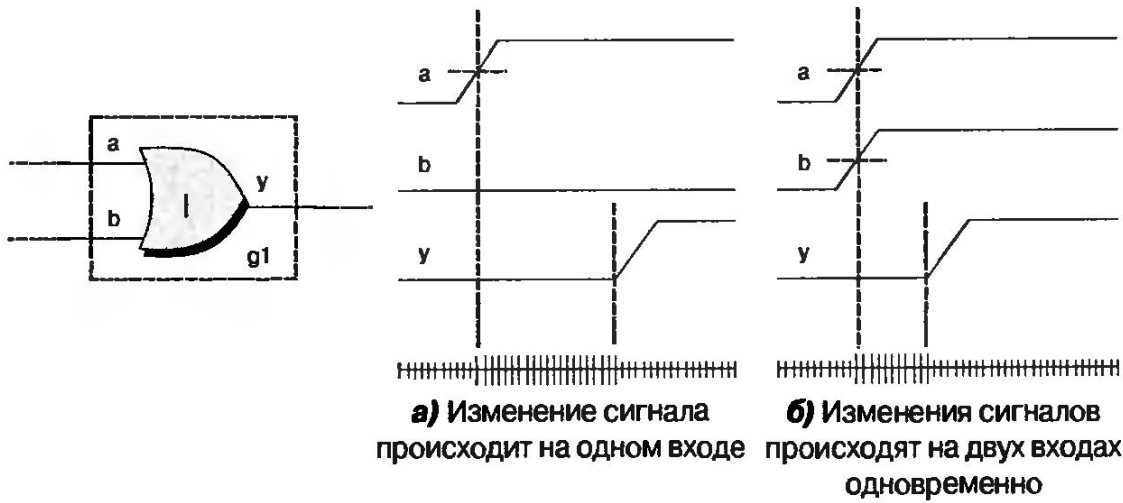


Рис. Б.20. Влияние изменения нескольких сигналов на задержку вывод-вывод

входные сигналы подаются не одновременно, а следуют друг за другом в непосредственной близости. Например, возьмем логический элемент ИЛИ, показанный на Рис. Б.20 и допустим, что изначально оба входа находятся в состоянии логического 0. Теперь представьте себе, что на входе *a* происходит изменение сигнала, которому соответствует стандартное, приведённое в справочнике значение задержки. Но до окончания этого времени на входе *b* также происходит изменение сигнала. В этом случае значение задержки будет находиться между двумя упомянутыми выше крайними случаями.

Влияние изменения нескольких сигналов на выходную характеристику

В дополнение к изменению значения задержки, одновременные изменения нескольких сигналов также влияют на выходную характеристику вентиля и, следовательно, на крутизну фронта выходного сигнала (Рис. Б.21).

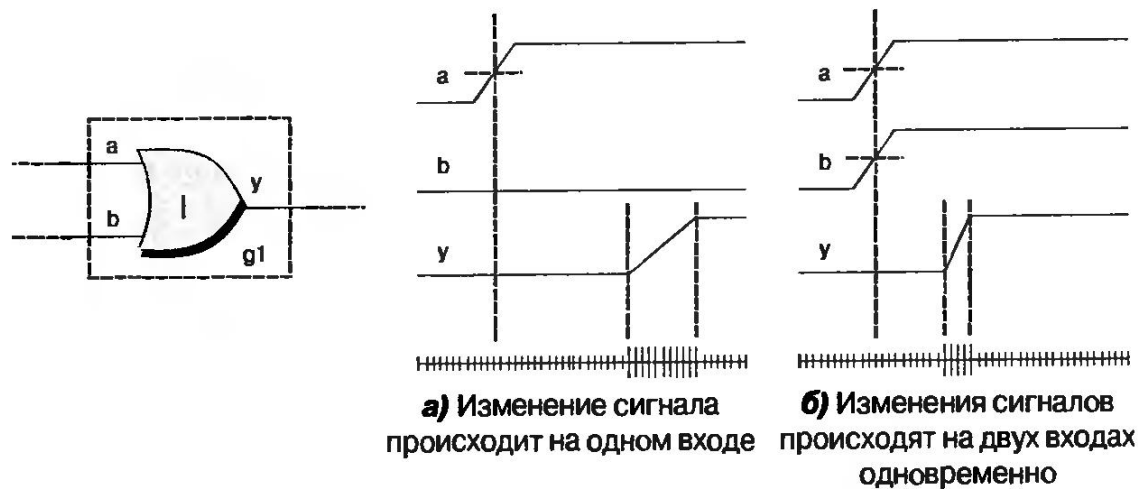


Рис. Б.21. Влияние изменения нескольких сигналов на выходную характеристику

Все эти эффекты, вызванные изменениями нескольких входных сигналов можно оценить простой линейной аппроксимацией. Но, к сожалению, современные средства верификации, такие как системы логического моделирования, не всегда обладают необходимыми модулями для расчёта «на лету» параметров этого типа.

1983 г. Персональный компьютер Lisa компании Apple впервые позволяет использовать компьютерную мышь и выпадающие меню.

1983 г. Журнал «Time» назвал компьютер Человеком года.

1984 г. Впервые изготовлена микросхема с памятью объёмом 1 Мбайт.

Паразитное отражение

В технологиях прошлых лет паразитные эффекты ещё можно было рассматривать как явления, с ограниченной областью распространения, которые проявляются в непосредственной близости от анализируемой точки. Рассмотрим, для примера, три вентиля, как показано на Рис. Б.22.

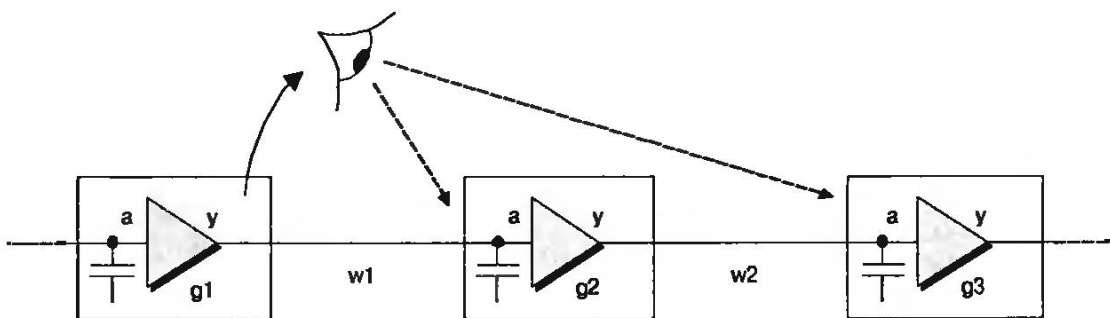


Рис. Б.22. Паразитное отражение

Раньше в таком примере можно было допустить, что логический элемент $g2$ будет служить буфером между элементами $g1$ и $g3$. Таким образом, сигнал с выхода $g1.y$ будет подвергаться влиянию паразитных элементов, например, ёмкостей, связанных только с проводником $w1$ и входом вентиля $g2.a$.

Эти предположения теряют свою истинность в сфере глубокого субмикрона. Возвращаясь к трём логическим элементам, показанным на Рис. Б.22, следует заметить, что теперь некоторая часть паразитного сигнала, связанная с проводником $w2$ и входом вентиля $g3.a$ может отразиться и пройти через вентиль $g2$ и тем самым повлиять на выход $g1.y$. Кроме того, если бы вентиль $g2$ представлял собой 2-входовую логическую функцию, например, исключающее ИЛИ, то величина этих паразитных явлений могла бы зависеть от состояния вентиля, то есть могла определяться логическим сигналом, установленным на другом входе.

Во время написания этой книги, отражённые паразитные сигналы слабо влияли на прохождение полезной информации. Однако этих эффектов следует бояться (очень бояться), так как существует вероятность того, что они будут проявлять себя с большей силой по мере того, как мы будем осваивать новые технологические процессы.

Выводы

Большинство из эффектов, влияющих на задержку распространения сигнала, представленных в этой главе, существовали всегда, даже в мультимикронных технологиях, но многие из них по степени своей значимости на три-четыре порядка были меньше других, и при анализе не рассматривались. Когда геометрические размеры устройств перешагнули через барьер в 0.5 микрона и достигли 0.35 мкм, то некоторые из этих эффектов начали проявлять себя сильнее, и их значимость стала возрастать с каждой новой ступенькой в технологии изготовления микросхем и понижении напряжения питания.

К сожалению, развитие многих средств верификации отстаёт от кремниевых технологий. Если эти средства не будут расширены, чтобы учитывать все эффекты, возникающие в области глубокого субмикрона, то разработчики будут вынуждены использовать жесткие ограничения для того, чтобы быть уверенными, что их устройство функционирует должным образом. Следовательно, разработчики не смогут воспользоваться всеми потенциальными возможностями новых технологий, которые появятся в недалёком будущем.