

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

5

МОСКВА · 1973

УДК 621.382.001.2

АЛГОРИТМЫ МАШИННОГО РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ НА ПРИБОРАХ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ

С. Г. РУСАКОВ, В. А. ШИЛИН

Новый перспективный класс интегральных элементов — приборы с зарядовой связью (ПЗС) — характеризуется по сравнению с МДП ИС более высоким быстродействием и уровнем интеграции, снижением потребляемой мощности и уменьшением стоимости [1–3].

На базе ПЗС могут быть просто реализованы сдвиговые регистры динамического типа. Трехтактная схема регистра на ПЗС приведена на рис. 1. Вследствие неполного переноса заряда и процессов генерации — рекомбинации неосновных носителей возникают искажения информации при ее передаче по цепочке ПЗС. Экспериментальные исследования показали [3], что при поступлении на вход подобного регистра последовательности сигналов логического 0 и одиночного сигнала логической 1 (или последовательности логических 1 и одиночного сигнала логического 0) на выходе наблюдается значительное искажение информации (рис. 2), которое зависит от количества элементов в цепочке, от управляющих напряжений и т. д. В связи с этим возникают следующие задачи расчета цифровых ПЗС-схем, требующие применения ЭЦВМ.

1. Определение соотношений между количеством разрядов сдвигового регистра и максимальной и минимальной тактовыми частотами.
2. Моделирование реакции схемы на последовательности сигналов логической 1 и логического 0.
3. Определение оптимальной формы тактовых импульсов, обеспечивающих минимальное время одной передачи заряда при заданном уровне помехи.

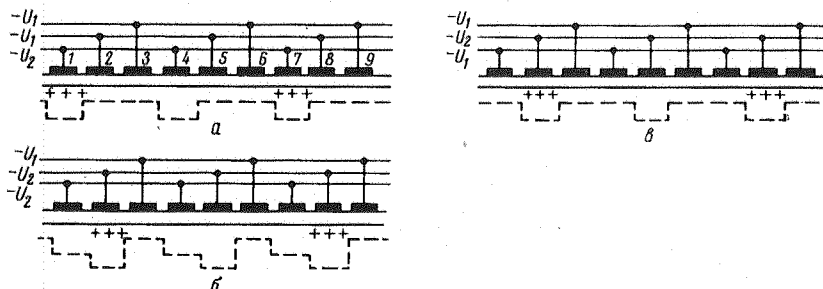


Рис. 1. Режимы работы трехтактной схемы на ПЗС. *a* — хранение информации в 1, 4, 7 приборах, *b* — передача информации, *c* — хранение во 2, 5, 8 приборах

Для решения указанных задач непосредственно применить известные программы анализа электронных схем не удастся по следующим причинам: 1) отсутствует модель ПЗС для машинного проектирования; 2) моделирование реакции схемы на последовательность входных импульсов с

помощью обычных программ расчета переходных характеристик привело бы к очень большим затратам машинного времени; 3) автоматизированные программы анализа схем не учитывают последовательный и регулярный характер конфигурации сдвиговых регистров на ПЗС, вследствие

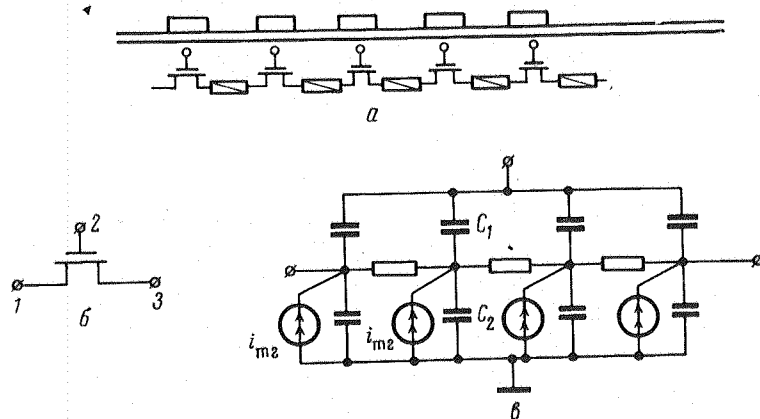


Рис. 2. Представление цепочки ПЗС эквивалентными элементами — *a*, условное обозначение ПЗС — *b* и его эквивалентная схема — *в*

чего анализ длинных цепочек оказывается невозможным из-за ограничения памяти ЭЦВМ.

В данной статье рассмотрены методы решения перечисленных задач, учитывающие особенности сдвиговых регистров на ПЗС.

Модель прибора с зарядовой связью

Сдвиговый регистр на ПЗС представляет последовательность МДП-структур, отделенных друг от друга зазорами (рис. 2, *a*). Поэтому для моделирования ПЗС-устройств необходимо разработать модель прибора с зарядовой связью и модель зазора между приборами.

Модель ПЗС. Во включенном состоянии (когда напряжение на затворе ПЗС больше порогового напряжения U_0 и у поверхности полупроводника образуется потенциальная яма для неосновных носителей) процесс передачи заряда описывается уравнением непрерывности [4]

$$\frac{\partial Q_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left[Q_p \cdot \bar{\mu}_p \frac{\partial \psi_s}{\partial y} + \varphi_T \frac{\partial}{\partial y} (\bar{\mu}_p \cdot Q_p) \right], \quad (1)$$

где Q_p — удельный локализованный в потенциальной яме заряд дырок, $\bar{\mu}_p$ — эффективная подвижность, ψ_s — поверхностный потенциал, который для ПЗС с p -каналами является отрицательным. Связь между ψ_s и Q_p устанавливается из одномерного условия электронейтральности суммарного заряда в МДП-структуре

$$Q_s + Q_{ss} + Q_p + Q_v = 0, \quad (2)$$

где Q_s , Q_{ss} , Q_v — удельные плотности зарядов затвора, поверхностных состояний и обедненной области в полупроводнике.

Выражая из уравнения (2) потенциал, получим [4]

$$\psi_s = U_s' + \frac{Q_p}{C_n} - \frac{A^2}{2} + A \sqrt{\frac{A^2}{4} - U_s' - \frac{Q_p}{C_n}}, \quad (3)$$

где $U_s' = U_s - U_0 + \varphi_0 - U_B$; φ_0 — потенциал инверсии, N_D — концентрация примеси в подложке, $U_B = A(-\varphi_{s0})^{1/2}$, $C_{\pi} = \epsilon_{\pi}\epsilon_0/d$ — удельная емкость затворного диэлектрика толщиной d , $A = 1/C_{\pi}(2q\epsilon_{\pi}\epsilon_0N_D)^{1/2}$.

Приближенная эквивалентная схема с сосредоточенными параметрами (рис. 2, б, в) получается, если производные по координате в уравнении (1) заменить разностными формулами.

Элементы эквивалентной схемы C_1 , C_2 , g определяются выражениями

$$C_1 = C_{\pi} \cdot \Delta y \cdot w, \quad C_2 = \frac{C_{\pi} A}{2V\psi_s} \Delta y w,$$

$$g = \frac{w}{\Delta y} \left[Q_p \cdot \bar{\mu}_p + \varphi_T \frac{\partial}{\partial \psi_s} (\bar{\mu}_p Q_p) \right], \quad (4)$$

где w — ширина затвора, Δy — длина элемента при разностной аппроксимации производных $\partial \psi_s / \partial y$ и $\partial^2 \psi_s / \partial y^2$, $\Delta y = L/K$, L — длина затвора, K — количество разбиений.

Генераторы токов $i_{tr}(\psi_s)$ отражают процесс накопления в потенциальной яме ПЗС паразитного заряда, образующегося за счет термогенерации носителей на поверхности и в обедненном слое.

При практических расчетах для эквивалентной схемы одного ПЗС можно ограничиться 3–4 секциями (рис. 2, в).

Модель зазора. В режиме передачи информации в области зазора между соседними ПЗС образуется продольное «тянущее» электрическое поле, под действием которого дырки переходят в более глубокую потенциальную яму. Приближенные условия образования «тянущего» поля в зависимости от потенциалов ψ_{s1} и ψ_{s2} следующие [4]:

$$\varphi_{s2} - \varphi_{s1} + al^2/2 \leq 0, \quad (5)$$

где $a = qN_D / \epsilon_{\pi}\epsilon_0$, l — длина зазора.

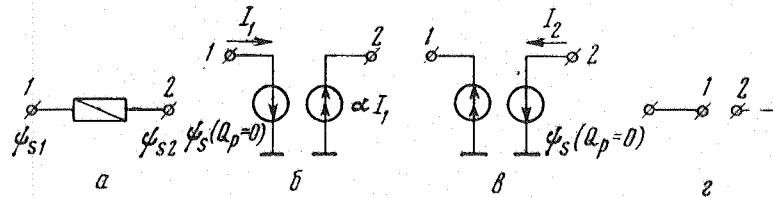


Рис. 3. Условное обозначение зазора — а и его эквивалентные схемы — б, в, г при различных соотношениях потенциалов ψ_{s1} и ψ_{s2}

При выполнении этого условия под действием поля дырки уходят от правой границы и можно считать, что их концентрация в точке 1 (рис. 3 а) равна 0; потенциал в этой точке определяется из соотношения (3). Часть дырок, проходящих через зазор, захватывается поверхностными состояниями, а остальные попадают в следующую потенциальную яму. Таким образом эквивалентная схема зазора при выполнении условия (5) выглядит следующим образом (рис. 3, б), где α ($\alpha < 1$) — коэффициент переноса носителей через зазор. Условию, противоположному (5) ($\varphi_{s1} - \varphi_{s2} - al^2/2 \leq 0$), соответствует эквивалентная схема (рис. 3, в). Во всех остальных случаях зазор можно представить как разрыв электрической цепи (рис. 3, г).

Моделирование периодических процессов в ПЗС-схемах

Задача анализа сдвиговых регистров, которая является важной составной частью сформулированных во введении задач машинного расчета

ПЗС-устройство, заключается в определении «качества» передачи или хранения информации при заданных частоте и форме тактовых импульсов, количестве разрядов регистра и параметрах ПЗС. Характерной особенностью анализа схем на ПЗС является необходимость расчета установившихся режимов, соответствующих бесконечной последовательности входных импульсов. Очевидно, что расчет с помощью известных программ анализа реакции схемы последовательно на каждый входной импульс требует чрезвычайно больших затрат машинного времени.

В данном случае предлагается использовать методику моделирования нелинейных периодических процессов, причем могут быть применены алгоритмы, описанные в работах [5, 6]. В этих статьях для расчета периодических режимов в электронных схемах применяется метод Ньютона при решении нелинейной краевой задачи [7].

В настоящей работе использовался алгоритм моделирования нелинейных периодических процессов [5]. Модель схемы в этом случае представляется системой обыкновенных дифференциальных уравнений F

$$F(\dot{X}, X, t) = 0. \quad (6)$$

Искомая вектор-функция $X(t)$ должна удовлетворять условию

$$X(0) - X(T) = 0, \quad (7)$$

где T — период (в нашем случае это период тактовых импульсов).

Задача интегрирования системы (6) на отрезке $[0, T]$ при условии (7) представляет собой нелинейную краевую задачу.

Наиболее целесообразно в нашем случае для ее решения применять метод сведения к задаче Коши [7]. Этот метод приводит к решению системы нелинейных уравнений (7) относительно вектора $X(0)$, причем на каждом шаге итерационного процесса вектор $X(T)$ находится в результате интегрирования системы (6) при начальных условиях $X(0)$. Для решения системы (7) применяется метод Ньютона, причем отметим, что эффективность его применения определяется способом вычисления матрицы производных $\frac{\partial X(T)}{\partial X(0)}$, которая нужна для итерационного процесса. Матри-

цу $\frac{\partial X(T)}{\partial X(0)}$ предлагается находить из решения систем уравнений в вариациях

$$\frac{\partial F}{\partial X} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial X(t)}{\partial X(0)} \right) + \frac{\partial F}{\partial X} \left(\frac{\partial X(t)}{\partial X(0)} \right) = 0. \quad (8)$$

(Начальные условия задаются единичной матрицей.)

Этот алгоритм эффективен, так как используемый для интегрирования системы дифференциальных уравнений (1) метод [8] предполагает вычисление на каждом шаге матриц $\partial F / \partial X$ и $\partial F / \partial \dot{X}$.

Таким образом, система (6) и система уравнений в вариациях (8) могут решаться одновременно, т. е. за один процесс интегрирования находятся как $X(T)$, так и матрица производных $\frac{\partial X(T)}{\partial X(0)}$.

Использование такого алгоритма в рассматриваемом случае позволило решить сложную с вычислительной точки зрения задачу расчета установившегося режима в сдвиговых регистрах на ПЗС. Отметим также простоту автоматического составления уравнений в вариациях.

**Алгоритм расчета переходных процессов
в сдвиговых регистрах на ПЗС
с помощью автоматизированных программ анализа**

Рассмотрим особенности автоматического составления и интегрирования системы дифференциальных уравнений (6), описывающей динамические режимы сдвиговых регистров на ПЗС (рис. 1).

Так как анализируемая цепь может содержать большое количество элементов, требование экономии машинной памяти является в данном случае основным для алгоритма расчета. При использовании неявного метода интегрирования системы (6) и решении разностных уравнений методом Ньютона [8] число узлов анализируемой схемы ограничивается в основном максимальным размером матрицы проводимостей $\partial F / \partial X$ и емкостей $\partial F / \partial \dot{X}$.

В случае автоматического составления уравнений (6) значительная память требуется также для матрицы, содержащей информацию о конфигурации схемы.

В задачах расчета сдвиговых регистров на ПЗС целесообразно учитывать их специфические особенности, а именно: однонаправленный (последовательный) характер конфигурации схемы (рис. 2, а) и периодичность ее структуры.

Ввиду последовательного соединения элементов в цепь взаимные проводимости и емкости имеются лишь между соседними узлами. В результате матрица коэффициентов линейных уравнений,

$$A_i Y_{i-1} - B_i Y_i + C_i Y_{i+1} = -F_i, \quad (9)$$

решаемых на каждом шаге интегрирования, имеет трехдиагональный вид.

Наиболее удобным способом решения системы такого вида является метод прогонки, часто применяемый при решении уравнений в частных производных [9]. Решение (9) ищется в виде

$$Y_i = \alpha_{i+1} Y_{i+1} + \beta_{i+1}, \quad (10)$$

где α_i и β_i определяются рекуррентными формулами

$$\alpha_{i+1} = \frac{C_i}{B_i - \alpha_i A_i}, \quad \beta_{i+1} = \frac{A_i \beta_i + F_i}{B_i - \alpha_i F_i}. \quad (11)$$

В нашем случае $\alpha_1 = 0$, $\beta_1 = 0$.

Такой способ существенно экономит машинную память, так как вместо матрицы достаточно хранить в памяти два вектора прогоночных коэффициентов $[\alpha]$ и $[\beta]$, причем автоматическое составление уравнений сводится к автоматизации расчета этих коэффициентов.

Коэффициенты α_i и β_i вычисляются после обращения к модели i -го компонента в цепи. Одновременно вычисляются прогоночные коэффициенты для систем уравнений в вариациях (8). Так как в этом случае меняется лишь способ вычисления правых частей в (9) F_i , то каждой системе уравнений (8) будет соответствовать свой вектор $[\beta]$, а вектор $[\alpha]$ — общий для всех систем.

Учет в разработанной программе свойств периодичности рассматриваемой структуры (рис. 3) позволил дополнительно сократить требуемые массивы памяти и упростить запись исходной информации для составления уравнений. Вместо топологической матрицы всей схемы запоминается

матрица межсоединений для одного бита информации (элемента регистра) (рис. 1) и количество таких элементов.

Таким образом, предлагаемый алгоритм позволяет значительно экономить объем памяти ЦВМ, упростить запись исходной информации для составления систем уравнений (6) и (8) и несколько повысить скорость вычислений.

Отметим возможность применения такого подхода и для анализа ПЗС регистров кольцевого типа (с рециркуляцией информации) [2], т. е. когда вход и выход регистра соединены. В этом случае следует применить метод циклической прогонки [9].

В качестве примера был рассчитан процесс передачи информационного заряда в трехтактном регистре на ПЗС (рис. 1) емкостью 8 бит (24 элемента) при частоте работы 15 МГц, значениях управляющих напряжений: $U_1 = 0$; $U_2 = -10$ В; $U_3 = 20$ В и длительности импульсов 22 нс. Параметры ПЗС следующие: $L = 6$ мкм, $l = 3$ мкм, $N_D = 5 \cdot 10^{14}$ см $^{-3}$, $U_0 = 4$ В, $Q_p / C_d = 4$ В, $\alpha \approx 1$.

Рассчитанная кривая последовательного уменьшения величины заряда при передаче приведена на рис. 4.

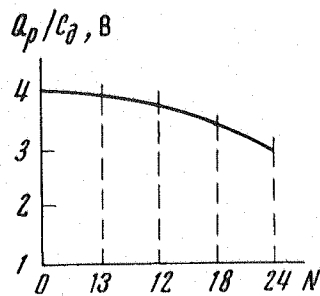


Рис. 4. Уменьшение величины информационного заряда при передаче через N -элементов

Выводы

1. Разработана математическая модель прибора с зарядовой связью для машинных расчетов интегральных схем.
2. Для расчета установившихся динамических режимов в сдвиговых регистрах на ПЗС разработан алгоритм моделирования нелинейных периодических процессов. Алгоритм предусматривает решение нелинейной краевой задачи методом Ньютона, причем за один процесс интегрирования вычисляются как невязка, так и матрица необходимых производных.
3. Разработан алгоритм автоматического составления уравнений для анализа сдвиговых регистров на ПЗС, учитывающий периодичность структуры и однородность элементов рассчитываемой цепи. Применение алгоритма значительно сокращает необходимый объем памяти ЦВМ.

Поступила в редакцию
27 ноября 1972 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Boyle W. S., Smith G. E. Charge-Coupled Semiconductor Devices, B.S.T.J., 1970, vol. 49, № 4.
2. Альтман Л. Электроника, 1971, т. 44, № 13.
3. Носов Ю. Р., Шилин В. А. Зарубежная электронная техника, 1972, № 13.
4. Носов Ю. Р., Шилин В. А. Микроэлектроника, 1973, т. 2, № 1, стр. 36—45.
5. Гурарий Н. М., Зарудный Д. И., Русаков С. Г. Автоматика и вычислительная техника, 1973, № 1.
6. Эйприл Т., Трик П. Анализ стационарного режима нелинейных цепей с периодическими входными сигналами. ТИИЭР, 1972, № 1.
7. Шаманский В. Е. Методы решения краевых задач, ч. II, Киев, «Наукова думка», 1966.
8. Гурарий М. М., Зарудный Д. И. Электронная техника. Сер. VI. Микроэлектроника, 1971, № 5.
9. Самарский А. А. Введение в теорию разностных схем., М., «Наука», 1971.