

УДК 621.327:519.95

Г.Г.Фурсин

ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЙРОПОДОБНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПОМОЩЬЮ ПЕРСОНАЛЬНОГО КОМПЬЮТЕРА

(Московский физико-технический институт)

Известно, что при измерении статических и динамических параметров и при проверке функционирования интегральных схем и их элементов широко используют автоматизированные измерительные комплексы, а при их расчете широко используют системы автоматизированного проектирования. Аналоговые или цифровые нейрочипы для современных нейрокомпьютеров выполняют на основе обычных транзисторов, поэтому их измерение и проектирование проводят аналогично вышесказанному. Исследование и проектирование нейроподобных элементов (НЭ) и искусственных нейросетей на их основе резко усложняются, если для их создания используются новые схемы, новые интегральные конструкции элементов или новые физические принципы их функционирования.

В данной статье приводятся предварительные результаты работы, направленной в перспективе на полностью автоматизированное измерение статических и динамических характеристик новых нейроподобных элементов с использованием различных методов обработки полученных данных и аппроксимации (например, полиномиальной), замкнутое на расчет и оптимизацию характеристик с помощью распространенных САПР, например, широко известной программы SPICE. В общем случае для этого необходимы управляемые персональным компьютером генератор напряжения и измеритель. Первое устройство задает на любую нагрузку (или вход измеряемого элемента) трапецидальный импульс с требуемыми амплитудой, длительностью, фронтом и срезом, а второе - с максимальной возможной скоростью производит измерения напряжения в различных точках (выходах измеряемого элемента).

Программно анализируя полученные экспериментальные данные, можно, с одной стороны, скорректировать процесс измерения, и тогда указанные данные надо рассматривать как промежуточные. Для получения окончательных экспериментальных данных можно, например, автоматически увеличивать шаг измерения на пологих участках характеристик и уменьшать - на крутых участках или точках перегиба элементов с немонотонными вольтамперными характеристиками (ВАХ), что позволяет уменьшить время измерения и одновременно повысить его точность. С другой стороны, можно строить модели практически любой сложности для элементов, использующих нестандартные или новые физические механизмы работы. Последнее особенно важно, если элементы предназначены для применения, в частности, в нейронных сетях, где принципиальным является коллективное поведение огромного числа элементов, которое нельзя прогнозировать без точного машинного расчета. Это важно и для анализа новых нанозлектронных приборов, технология которых недостаточно отработана, характеристики же часто невоспроизводимы, но тем не менее требуется однозначно разобраться с тем, какой именно физический механизм (например, туннельный, оптический и т.п.) преобладает на том или ином участке характеристики исследуемого прибора.

Указанный выше "глобальный" подход, однако, требует существенных аппаратных затрат. Ниже показано, как на первом (локальном) этапе можно с минимальным набором микросхем сделать эмулятор характеристики графа (ЭХ), который позволяет измерять как ВАХ обычных полупроводниковых приборов так и измерять статические характеристики нейроподобных элементов.

Упрощенная схема ЭХ показана на рис. 1. Он не требует включения в состав компьютера платы расширения возможностей ввода-вывода, а использует стандартный параллельный порт. Эмулятор содержит ЦАП (цифро-аналоговый преобразователь) и АЦП (аналогово-цифровой преобразователь) последовательного приближения.

ЦАП формирует на выходе ЭХ напряжение, величина которого задается программно. Число разрядов данного цифро-аналогового преобразователя равно десяти, а напряжение на его выходе может изменяться от -5.12 до 5.12 В с шагом 0.01 В. Так как количество разрядов, доступных

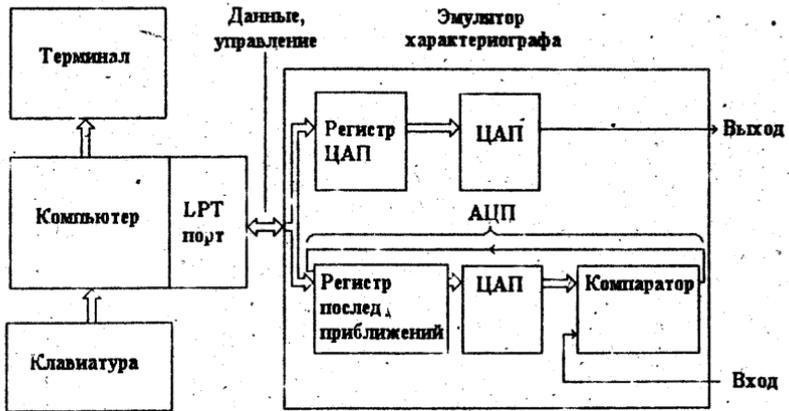


Рис. 1

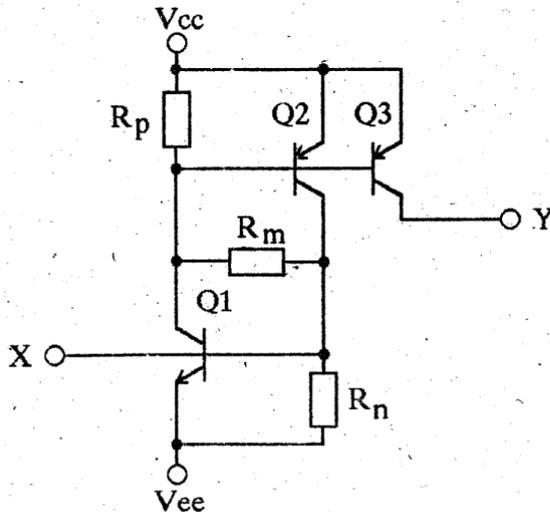


Рис. 2

для программирования в параллельном порте, меньше требуемого для управления преобразователем, то используется дополнительная микросхема - регистр, переводящий последовательный код в параллельный. Таким образом, в параллельном порте используются только три разряда - для данных, строга и сброса. При программировании число, соответствующее требуемому напряжению, переводится в последовательный код и передается через параллельный порт в регистр. Регистр переводит код в параллельный и выдает его на ЦАП, что позволяет сформировать на выходе требуемое напряжение.

АЦП измеряет напряжение в требуемом диапазоне. Число разрядов данного аналогово-цифрового преобразователя равно десяти. Он может измерять напряжение в пределах от -5.12 до 5.12 В с точностью 0.01 В. АЦП выполнен на трех микросхемах. Это регистр последовательных приближений, ЦАП и компаратор. Измерение напряжения происходит за 10 тактов (равно числу разрядов). В параллельном порте используются 3 разряда (как и для управления цифро-аналоговым преобразователем) - для данных, строга и сброса. После каждого такта сигнал с компаратора подается на регистр последовательных приближений и в компьютер в виде последовательного кода. Затем программно он преобразуется в параллельный, что позволяет получить значение напряжения на входе ЭХ.

Исследованный нейрноподобный элемент показан на рис. 2. Он образован двумя комплементарными транзисторами Q1 и Q2. Дополняющий тип проводимости обеспечивает, при определенных условиях, положительную обратную связь по току. При изготовлении по интегральной технологии такие транзисторы хорошо интегрируются в очень компактный активный элемент. Если используется кремний, то показанные на рисунке резисторы R_p , R_n , R_m не нужны, хотя в случае необходимости современные технологии и оригинальные конструкции позволяют изготовить их практически без увеличения размеров основного (базового) элемента. В общем же случае, особенно на стадии предварительных экспериментов и расчетов, применение таких резисторов очень полезно, так как позволяет для любых типов транзисторов и любого материала изменять параметры НЭ в исключительно широких пределах.

Рассмотренные компоненты НЭ фактически представляют аналог тиристора, у которого катодом является эмиттер первого транзистора $n-p-n$ -типа проводимости (обозначен как вывод V_{cc} , на который подается отрицательное напряжение), а анодом является эмиттер второго транзистора $p-n-p$ -типа проводимости (обозначен как вывод V_{cc} , на который подается положительное напряжение). Входом X является база транзистора $Q1$; вытекающий в нее ток позволяет управлять характеристикой. На стадии отладки использовался НЭ только с одним выходом Y , которым является коллектор транзистора $Q3$; вытекающий из него ток определяется входным током. В нейрончипе или в практической модели нейронной сети выходов у одного НЭ может быть очень много, для этого вместо транзисторов $Q2$ и $Q3$ выполняется один сверхинтегрированный многоколлекторный транзистор $p-n-p$ -типа проводимости. На последующих рисунках 3а и 4а, чтобы не загромождать их, нейрноподобный элемент обозначен прямоугольником НЭ, а перечисленные выше выходы V_{cc} , V_{cc} , X , Y не указаны. Они расположены "в тех же местах", что и на рис. 2.

Если у этого элемента вход и выход оборваны, а нижний вывод заземлен, то подавая изменяющийся ток на верхний вывод, как показано на рис. 3а, можно снять его $V \wedge X$. Здесь надо сделать важное замечание. Часто на практике нужно задавать или измерять именно ток, а не напряжение. В SPICE можно просто вывести значение тока через любой элемент, в рассматриваемом же ЭХ для определения тока измеряется напряжение на резисторе известной величины. В данном случае вольтамперной характеристикой будет зависимость напряжения на аноде (выводе V_{cc} у НЭ) от протекающего через него тока. Так как элемент имеет S -образную $V \wedge X$, то в эмуляторе характеристики графа при ее измерении ("в качестве аргумента") используется именно ток, для этого сопротивление нагрузочного резистора выбирается достаточно большим (оно должно быть больше модуля отрицательного дифференциального сопротивления); измеряется падение напряжения на нем и с помощью элементарного пересчета вычисляется ток. Одна из экспериментальных $V \wedge X$ показана на рис. 3б. Некоторые "изъяны" на ней связаны с тем, что на данном этапе работы принципиально не использовались согласующие и развязывающие элементы, которые обязательно нужны в общем случае, а при ее построении пока

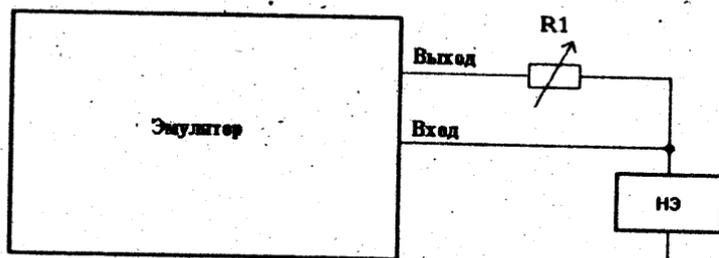


Рис. 3а

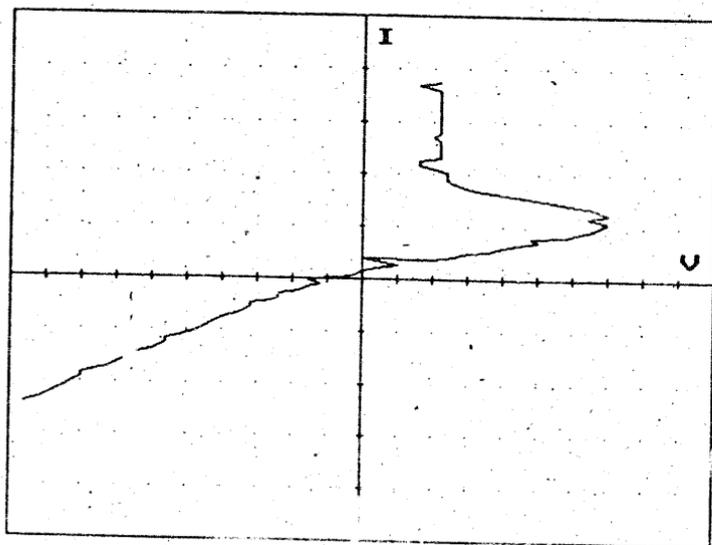


Рис. 3б

принципиально не использовались различные общеизвестные и легко реализуемые алгоритмы усреднения данных и сглаживания кривых.

Если у нейроподобного элемента верхний вывод подключить к постоянному положительному питанию, а на вход X подавать увеличивающийся ток, то можно определить вытекающий из выхода Y ток как пороговую функцию входного тока. Соответствующая схема показана на рис. 4а. При расчете с помощью SPICE рассматриваемого НЭ или при его работе в реальной нейронной сети нагрузкой для выхода является диод - эмиттерный переход следующего p-p-n-транзистора. В рассматриваемой же работе выход Y заземляется через "токовый" резистор R2, который и является нагрузкой. Его сопротивление выбирается минимальным (например, 10 или 100 Ом), чтобы транзистор Q3 никогда не входил в насыщение. Зная сопротивление и измерив падение напряжения на нем, тривиально находим ток. Наоборот, сопротивление резистора R1 выбирается максимальным, чтобы не влиять на ВАХ элемента и его ток включения.

Передаточная характеристика традиционных логических элементов является зависимостью выходного напряжения от входного напряжения. У рассматриваемого нового типа нейроподобных элементов передаточная характеристика является токовой; она приведена на рис. 4б. Хорошо видно, что пока входной ток не превышает некоторое значение, называемое порогом, выходной ток очень мал (левая часть характеристики). В логических терминах это соответствует наличию Нуля на выходе НЭ. Когда же входной ток больше этого порога, выходной ток резко увеличивается. В логических терминах это соответствует появлению на его выходе Единицы (правая часть характеристики). Масштаб тока на этом рисунке и на рисунке 3б выбран одинаковым - по 0.1 мА в делении.

На практике в нейронных сетях выходы предыдущих нейроподобных элементов рассматриваемого типа объединяются по аналогии с функцией Монтажное ИЛИ (Проводное ИЛИ) и подключаются ко входу рассмотренного элемента. Важное его отличие от традиционных цифровых интегральных схем состоит в том, что там осуществляется именно логическое сложение (по правилам алгебры логики), здесь же осуществляется аналоговое суммирование входных сигналов, и с порогом сравнивается именно обычная

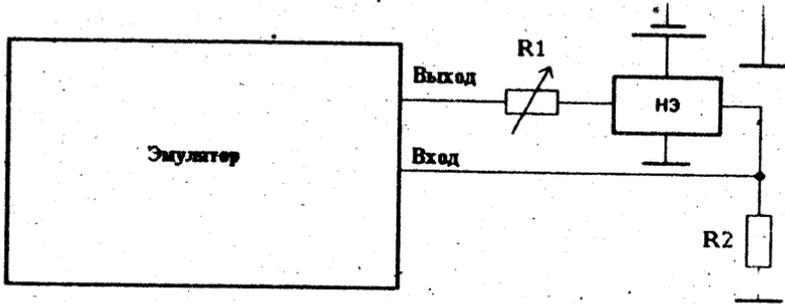


Рис. 4а

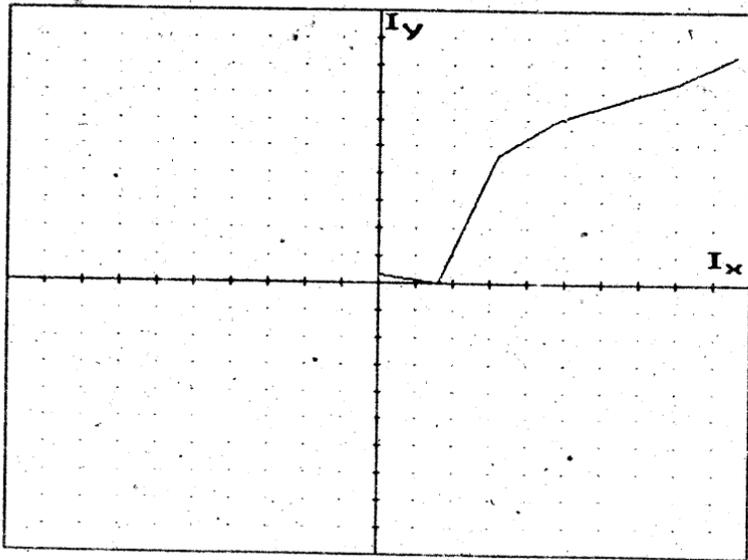


Рис. 4б

алгебраическая сумма входных токов. Крутизна трех участков передаточной характеристики данного НЭ определяется параметрами его компонентов и может регулироваться требуемым образом, причем различие токов слева и справа от центрального ("вертикального") участка может быть как очень большим (на несколько порядков, что на рисунке было бы не очень наглядно), так и незначительным. Расчет с помощью SPICE дает адекватные результаты.

Конечно, описанный эмулятор характериографа имеет ограниченные возможности, например, по диапазонам измеряемых токов и напряжений, однако позволяет измерять характеристики не только микроощных интегральных тестовых элементов, но и более мощных дискретных приборов. Например, сравнивались на реальном характериографе и его эмуляторе диоды из германия, кремния, арсенида галлия с обычной экспоненциальной характеристикой и с немонотонной: N-образной ВАХ у туннельных диодов и S-образной ВАХ у тиристоров. На данном этапе удалось получить два важных результата. Во-первых, были программно замкнуты с приемлемой точностью измерение и машинный расчет. Во-вторых, использовался минимум оборудования и схем; поэтому рассмотренный эмулятор можно подключить практически к любому персональному компьютеру. Был разработан оригинальный пакет прикладных программ, позволяющих как управлять процессом измерения, так и создавать некоторые файлы. Часть из них содержит данные измерений, другие запускают эмулятор электронных схем SPICE и позволяют на основе полученных при расчете данных автоматически изменять шаг измерения и структуру моделей элементов.

Поступила в редколлегию 10.01.97
в редакцию 14.01.97