

Коллективные эффекты в сетях из негатронных элементов

© Л.О. Бартонев, С.А. Башарин, М.Ю. Бычков, А.А. Кальнин, А.В. Королев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет,
197376 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 29 декабря 1995 г.)

Представлены результаты численного моделирования и экспериментальных исследований сетевой системы составленной из элементов с отрицательным дифференциальным сопротивлением (негатронов). Показано, что подобные системы обладают ценными функциональными свойствами, обусловленными кооперативным взаимодействием элементов, что позволяет их использовать для создания информационных систем для анализа и распознавания образов. Введен вариационный принцип, определяющий с макроскопических позиций направление эволюции состояния сети под влиянием сигнальных воздействий. Отмечается возможность технологической интеграции негатронных сетей, продуктом которой может стать создание новых материалов электронной техники относящихся к классу синергетических материалов.

Введение

В последние годы наблюдается существенный прогресс в создании систем с параллельной обработкой информации. Наряду с быстрым развитием синергетических компьютерных систем [1] значительный интерес представляет создание физических адаптивных систем с эмпирическим обучением условной ответной реакции [2,3], в которых вычислительный адаптационный процесс замещен его прямой физической реализацией. Известно, что вычислительные системы обладают ценными качествами и прежде всего защищенностью преобразовательного акта от колебаний режимов питания, температуры окружающей среды и других факторов, что обеспечивает эксплуатационную надежность систем. Однако в практических разработках следует принять во внимание также неоспоримые положительные качества, свойственные физическому адаптационному процессу: глубокое распараллеливание сигнального действия, безадресность процесса адаптивного движения и высокая конструктивная степень свободы, допускающая случайный характер связи активных элементов, что создает основу технологической надежности в создании физических адаптивных систем.

Следует, однако, заметить, что существуют значительные трудности в создании физических адаптивных систем, обусловленные функциональным дефицитом в элементарной базе электронной техники. Такие важнейшие качества, требуемые от элементов как градируемость физической величины с сохранением в памяти ее значения [2], способность к перераспределительным реакциям в коллективных отношениях [3], накопительно-пороговые реакции под влиянием сигнальных воздействий [4], приходится имитировать схемными решениями. Очень мало работ, направленных на создание материалов (сред) с адаптивными свойствами.

Поскольку конечной целью проводимого исследования является оценка возможностей создания новых материалов (сред), имеющих значение в электронике, то главное внимание уделялось изучению макроскопических реак-

ций сетевой системы, обусловленных кооперативным взаимодействием элементов ее составляющих. Использование теории цепей в вычислительном моделировании (т.е. микроскопический анализ токов, напряжений) производилось для выявления характерных макроскопических реакций и последующего обобщения на системы со случайным соединением элементов в сетевую систему.

1. Вычислительное моделирование адаптивной реакции негатронной сети на регулярные сигнальные воздействия

Анализ адаптационного процесса производился с использованием модели, представляющей собой регулярную сеть из негатронных элементов (рис. 1, а) с координационным числом $z = 4$ (квадратная сеть). Вольт-амперная характеристика (ВАХ) негатронного элемента (негатрона) в модельном представлении имела две симметричные складки; точкой симметрии являлось начало координат (рис. 1, б). Такое представление ВАХ соответствует простой кусочно-линейной аппроксимации реальной ВАХ двух встречно-согласно включенных туннельных диодов. Активное состояние сети обеспечивалось пропусканием токов I_0 фиксированного значения через множество входных и выходных электродов. Значение тока смещения I_0 отмечено на приведенной ВАХ. Сигнальные напряжения, изменяющие электрическое состояние сети u_{ab} , u_{cd} подавались между соответствующими a , b и c , d узлами сети. Формат двумерной модели сети составлял 7×7 узлов. Их нумерация в дальнейшем было последовательной и построеной от 1 до 49, при этом между узлами было включено 84 негатронных элемента.

Эквивалентная схема замещения негатронного элемента на трех характерных участках I–III (рис. 1, б) являла собой резистивный элемент с сопротивлением R_2 на участке II и резистивный элемент $R_{1,3}$ с включенным последовательно генератором напряжения E_0 на участках I и III с различной поляризованностью его включения. Не

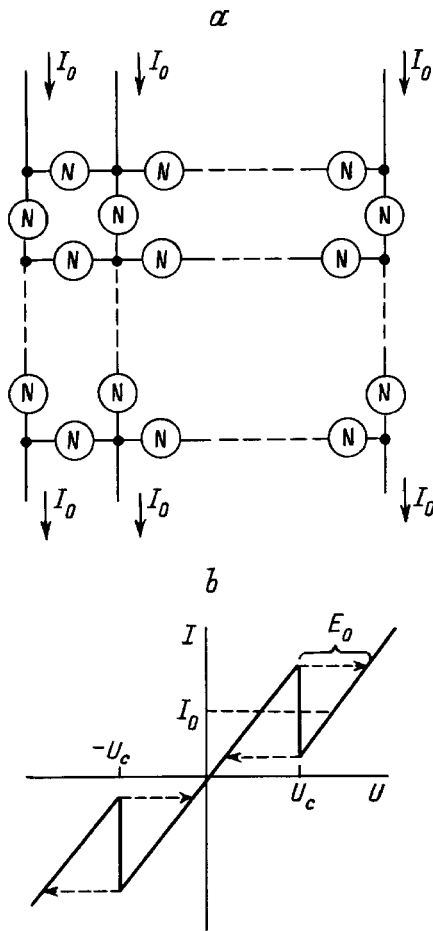


Рис. 1. Представление регулярной негатронной сети, использованное в вычислительном моделировании (а) и аппроксимация ВАХ негатронного элемента (б).

уменьшая общности выводов, получаемых в ходе исследования, можно было положить в расчетах равенство R_2 и $R_{1,3}$.

Между любой парой узлов p, q модели могло быть приложено внешнее сигнальное напряжение $E_{p,q}$. В определении конечного состояния системы важна последовательность приложений сигнальных напряжений к узлам и значения остаточных узловых потенциалов (токов в ветвях) после удаления внешних источников.

Итак, в качестве переменных, описывающих состояние сетевой системы, выбраны потенциалы 48 узлов по отношению к 49-му заземленному узлу. В стартовом состоянии сеть находится в невозмущенном состоянии, т.е. токи в продольных ветвях равны I_0 , токи в поперечных ветвях отсутствуют, нет внесенных источников напряжения в схеме замещения негатронов.

При разработке программы, обеспечивающей моделирование потенциальных переходов из различных состояний сети, существенны следующие методические трудности: система имеет альтернативные финальные адаптивные состояния, которые зависят от пути эволюционного движения, т.е. последовательности включения (выключе-

ния) внутренних источников напряжения; система имеет альтернативы путей эволюционного движения, т.е. в ней выражен эффект самоорганизации. Эти трудности были преодолены использованием метода расчета, при котором использовалось пошаговое постепенное приращение (уменьшение) внешних сигнальных напряжений и напряжений внутренних источников, имитирующих переключения негатронов. В случае возникновения альтернативы внутренних переключений конфликт разрешался с помощью генератора случайных чисел.

Для расчета потенциального и токового состояний сетевой системы после действия сигнальных напряжений использовался метод узловых потенциалов. Состояния сети представлены точками в пространстве размерности 48, т.е. векторами, начинающимися в начале координат и кончающимися в данной точке.

Для негатронной сетевой системы обозначим через A матрицу проводимостей электрической цепи, а через \tilde{A} — матрицу проводимостей цепи с источником сигнального напряжения $E_{p,q}$ между узлами p и q . До включения сигнального источника состояние сети изображается точкой P_0 в условном координатном пространстве; напряжение между узлами p и q до включения сигнального источника равняется $E_{p,q}^{(0)}$. Включение источника в невозмущенную сеть означает перемещение из начальной точки P_0 на величину $\tilde{A}^{-1} \cdot b_0$, где b_0 — столбец правой части системы уравнений, используемой в методе узловых потенциалов (см., например, [5]), соответствующий приращению напряжения $\Delta E_{p,q} = E_{p,q} - E_{p,q}^{(0)}$.

Для каждого негатрона границы областей I, II и II, III , разделяющих участки ВАХ являются гиперплоскостями

$$u_i - u_j = v_c, \quad u_i - u_j = -v_c, \quad (1), (2)$$

где i, j — номера узлов, между которыми находится данный негатрон; v_c — критическое значение напряжения (рис. 1, б).

Постепенное пошаговое увеличение напряжения между узлами p и q от величины $E_{p,q}^{(0)}$ до величины $E_{p,q}$ приводит к достижению некоторого критического значения напряжения, при котором происходит переход одного или сразу нескольких негатронов с одного участка ВАХ на другой. Набор одновременно переключающихся негатронов находится следующим образом. Пересечение в некоторой точке P_1 одной из гиперплоскостей вида (1) или (2) при движении из точки P_0 вдоль вектора $\tilde{A}^{-1} \cdot b_0$ требует включения (или выключения) внутреннего источника в соответствующей ветви сетевой системы. Это в свою очередь требует изменения правой части системы уравнений добавлением слагаемого b_1 , учитывающего включение (удаление) источника. Включение внутреннего источника напряжения символизирующего переход негатрона, например, со II на III участок, ВАХ означает перемещение из точки P_1 на величину $\tilde{A}^{-1} \cdot b_1$. Но при перемещении из точки P_1 на величину $\tilde{A}^{-1} \cdot b_1$ могут также встретиться гиперплоскости вида (1) и (2).

Каждый раз при очередном k -м по счету пересечении одной из гиперплоскостей необходима корректировка движения прибавлением к концу текущего вектора величины $\tilde{A}^{-1} \cdot b_k$. При этом происходит движение от точки P_k последнего пересечения к концу суммарного вектора. Такое движение в координатном пространстве приводит к точке Q , в которой завершаются переключения негатронов. Эта точка соответствует окончанию вектора

$$\tilde{A}^{-1} \sum_{k=1}^N b_k,$$

начинающегося в точке P_2 , где N — число негатронов, одновременно переключившихся по достижении точки P_1 . После нахождения набора переключившихся в точке P_1 негатронов продолжается движение вдоль вектора $\tilde{A}^{-1} \cdot b_0$, но уже из точки Q со следующей критической точки и т. д.

Описанная вычислительная процедура позволяет выяснить все переключения негатронов и последовательности их наборов при приложении внешнего сигнального напряжения $E_{p,q}$.

При моделировании процедуры снятия сигнального напряжения цепь с источником напряжения E_{pq} между узлами p и q заменяется эквивалентной цепью с источником тока I_{pq} между этими же узлами. Производится постепенное пошаговое уменьшение тока источника от величины I_{pq} до нуля. Вычислительная процедура полностью аналогична процедуре приложения сигнального напряжения с той лишь разницей, что теперь вместо матрицы \tilde{A} используется матрица A .

С помощью изложенной выше вычислительной модели исследовалось поведение негатронной сети под влиянием циклических потенциальных воздействий. Источники сигнальных напряжений подключались к произвольно выбранным парам узлов, а затем отключались, оставляя "отпечаток" своего воздействия. Последовательность их подключения (отключения) строго соблюдалась и была циклической, т. е. последовательность подключения повторялась до тех пор, пока отмечались эволюционные изменения состояния сети. При достижении финального (неизменного) состояния сети демонстрация напряжений заканчивалась.

Главное внимание в вычислительном моделировании уделялось изучению возможности введения вариационного принципа эволюции состояния негатронной сети под влиянием сигнальных воздействий. Для этого необходимо было введение функционала, отражающего макроскопическое состояние сети, и отслеживание его изменения при движении к предельному адаптивному состоянию. Среди нескольких возможных альтернативных формулировок функционала проверке на вычислительной модели были подвергнуты две из них. Первая может быть представлена следующим образом.

Сетевая система из негатронных элементов, имеющих складку N -типа и находящаяся в условиях постоянных токовых граничных условий, обеспечивающих электрическую многоустойчивость системы, эволюционирует

под влиянием потенциальных циклических сигнальных воздействий к предельному состоянию, характеризуемому минимальным значением суммы избыточных токов в ветвях,

$$\Phi = \sum_{m=1}^M \left| I_m^{(s,c)} - I_{m0} \right| \rightarrow \min, \quad (3)$$

где I_m — ток в m -ветви после действия сигнального межузлового напряжения в s -демонстрации c -цикла; I_{m0} — начальное значение тока в m -ветви до сигнального действия, соответствующее полностью выключенным внутренним источникам напряжения; M — полное число ветвей сети.

При введении функционала принималось во внимание то обстоятельство, что эволюционные изменения происходят вследствие достижения экстремальных токов в узлах, причем достижение пикового тока в какой-либо демонстрации сигналов, вызывающей включение внутреннего источника E_0 , уменьшает значение модуля тока, в то время как достижение тока впадины (выключение внутреннего источника) повышает его значение. Оба этих акта сбрасывают экстремальные токи, приближая токи к токам начального смещения I_{m0} . Напомним, что I_{m0} в вертикальных ветвях сети равен току смещения I_0 , а в горизонтальных ветвях — нулю.

Альтернативной формулировкой функционала является утверждение о минимизации в процессе эволюции суммы абсолютных значений разностей токов в смежных как по вертикали, так и по горизонтали ветвях

$$\Phi' = \sum_{m,n=1}^M |I_m - I_n| \eta(m, n), \quad (4)$$

где

$$\eta(m, n) = \begin{cases} 1, & \text{если } m\text{-ветвь смежна } n\text{-ветви} \\ & \text{(по горизонтали или по вертикали)} \\ & \text{и } m < n; \\ 0, & \text{если смежность отсутствует или } m \geq n. \end{cases}$$

Смысл данного функционала состоит в том, что сброс экстремального тока, например пикового, означает его перераспределение при фиксированных токовых граничных условиях с повышением его значения в смежных ветвях. Иными словами, в процессе эволюции происходит сброс резких токовых перепадов в ветвях или условных токовых градиентов.

Действенность указанных вариационных принципов проверялась на модели. При этом использовались самые различные варианты сигнальных демонстраций и их последовательностей. При моделировании действовало ограничение на уровни входных сигнальных напряжений: эти уровни не должны были препятствовать компромиссной адаптации при последовательных приложениях напряжений к выбранным парам узлов сети, т. е. достижению предельного потенциального состояния сети. В противном случае может возникнуть эффект циклического

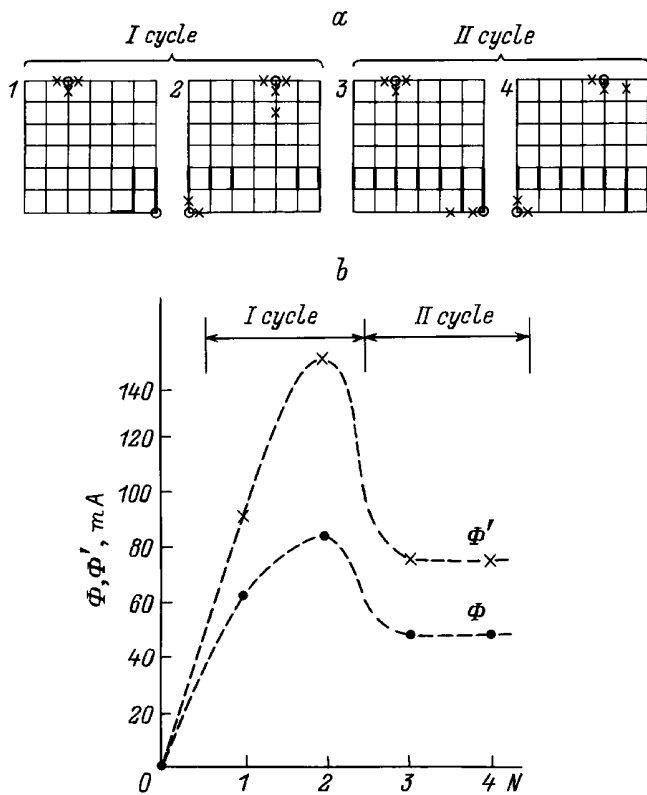


Рис. 2. Изменения потенциального состояния негатронной сети при последовательных циклических включениях (с отключением) сигнальных источников напряжений (а) и изменения макроскопических функционалов Φ и Φ' в зависимости от числа произведенных включений (б).

повторения потенциальных ситуаций. Заметим, однако, что даже в указанном случае возможно использование введенных функционалов, однако необходимо сравнение их значений после одинаковых демонстраций в их циклическом последовательности.

На рис. 2, а приведен типичный пример изменения состояния негатронной сети после включений и последующих за этим выключений источников сигнальных напряжений между узлами, отмеченными кружками. Жирными линиями отмечены ветви (негатроны), в которых остались включенными внутренние источники напряжений, символизирующие переключение негатронов. Крестиками обозначены негатроны переключившиеся во время приложения сигнальных напряжений, но возвратившиеся в "невозмущенное" состояние после снятия потенциального воздействия. Как видно из рисунка, сеть испытывает изменения состояния, однако демонстрация напряжений во втором цикле уже не изменяет состояния сети, т.е. достигается финальное потенциальное распределение.

На рис. 2, б показано изменение Φ -функционала, рассчитанного после каждой демонстрации. Видно, что наблюдается подъем значения суммы избыточных токов при 1-м и 2-м потенциальном воздействиях на узлы сети, а затем повтор этих демонстраций снижает сумму

избыточных токов. Заметим, что до включений сигнальных источников (стартовое состояние) она была равна нулю, т.е. стартовое состояние также является "притягательным" и требуется переход через максимум Φ для перехода в новое адаптивное состояние.

Эксперименты подтверждают минимизацию функционалов Φ , Φ' при эволюционном движении из произвольной стартовой ситуации. Ниже изложены некоторые важнейшие следствия этого заключения.

2. Характерные эффекты, свойственные негатронной сети

Дальнейшие исследования были проведены на специально созданной негатронной сетевой системе, составленной из арсенид-галлиевых туннельных диодов. Сеть представляла собой регулярно включенные в 2-мерную систему с координационным числом $z = 4$ негатронные элементы с симметричной складкой на вольт-амперной характеристике, что достигалось последовательным встречно-согласным включением пары туннельных диодов (рис. 3). Формат сети составлял 6×6 узлов, а число негатронных элементов составляло 66. Для обеспечения возможности визуального наблюдения за изменением потенциального состояния сети был создан светодиодный экран, на котором яркость свечения каждого светодиода была пропорциональна падению напряжения на негатронном элементе, находящемся в столбце, т.е. в направлении протекания тока смещения. Ток в столбцах задавался с помощью генераторов тока; при этом рабочая точка, как и в вычислительных экспериментах, составляла среднее значение между токами пика и впадины.

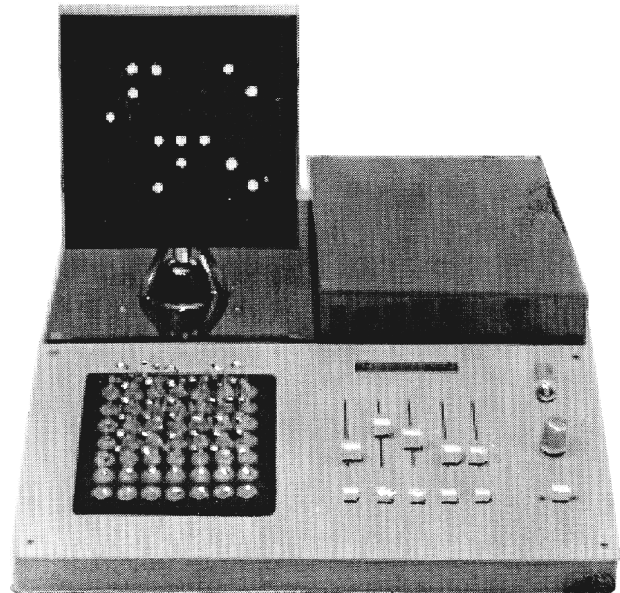


Рис. 3. Общий вид негатронной сети, собранной из туннельных диодов.

Универсальная панель позволяет производить переборку сети с изменением координационного числа z . Установка содержит пять потенциально независимых источников сигнальных варьируемых напряжений в любой последовательности.

Ниже представлены результаты экспериментальных наблюдений, полученные на созданной физической сетевой системе.

а) **Зонная структура узловых потенциалов.** Как известно [6], в одномерной цепи из негатронных элементов при пропускании тока смещения существует набор дискретных значений падений напряжения, число которых равно $(n + 1)$, где n — число негатронов в цепи. Такой системе свойственно вырождение потенциальных состояний, обусловленное существованием альтернативных вариантов распределения напряжения между негатронами, создающих одинаковое полное падение напряжения. Добавление 2-й мерности в характер межэлементной связности создает расщепление уровней с образованием специфических зон разрешенных узловых потенциалов. Поскольку вычисление всех возможных значений узловых потенциалов является трудновыполнимой задачей даже для сравнительно небольшого формата сети, то был поставлен эксперимент, в котором регистрировались остаточные после сигнального действия значения узловых потенциалов. При этом использовался генератор случайных (шумовых) сигналов.

На рис. 4 представлен характер распределения остаточных (разрешенных) потенциалов на 3-м узле (верхняя строка) физической негатронной сети. За нулевой отсчет потенциала был выбран потенциал 3-й узел нижней строки. Как видно из представленной диаграммы, значения узловых потенциалов группируются в специфические зоны разрешенных потенциалов $\Delta\varphi'$, чередуемые с "запрещенными" зонами $\Delta\varphi$. При этом ширина "разрешенной" зоны потенциалов сужается при движении к предельным значениям остаточных потенциалов (т.е. наибольшему и наименьшему).

Переходы между состояниями являются избирательными, что является ценным функциональным свойством системы, а вся совокупность разрешенных значений потенциалов является основой в реализации дискретно-аналоговой памяти.

б) **Критический размер области переключений потенциала.** Эксперимент показывает, что включение единичного негатрона в ситуации, когда все элементы в ближайшем окружении находятся в выключенном состоянии, приводит к его самовыключению. При большем значении сигнального напряжения, когда включаются и смежные негатроны, т.е. возникает область с измененным межузловым напряжением, она способна сохраняться при отключении сигнального напряжения. Существует критический размер (протяженность в шагах регулярной сети) области, способной сохранять остаточный потенциал. В нашем

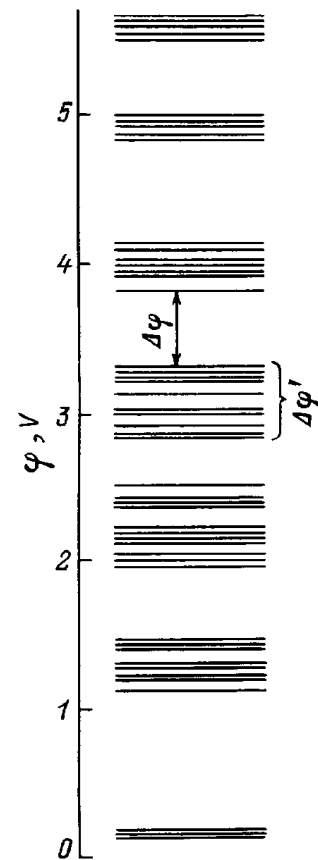


Рис. 4. Типичная структура остаточных после сигнальных действий потенциалов на одном из узлов сети.

случае он составляет 3 включенных негатрона в вертикальных ветвях, расположенных по горизонтали. Аналогичная ситуация имеет место при попытке выключения единичного негатрона.

Вообще имеется некоторый размер области со множеством смежно расположенных включенных негатронов, до которого система стремится к самовыключению негатронов, а при превышении которой — с саморазрастанию, если на систему действует активирующий переключения шумовой сигнал. Основываясь на введенном вариационном принципе эволюции состояния негатронной сети, можно сказать, что оба предельных состояния (полностью включенная или выключенная строка) обеспечивает нулевую сумму избыточных токов в ветвях.

в) **Адаптивное изменение порога включения негатронов.** Это ценное свойство, которое может быть использовано при создании нейросетевых адаптивных систем, проявляется в следующем виде. Если между узлами сети пропускается токовый сигнал включения негатрона, то существует его определенная величина, при которой происходит включение негатрона вместе с его окружением (раздел 2, б). Если далее обнулить напряжение между узлами или дать ток обратного направления, то произойдет выключение негатрона. При этом, однако, в системе может остаться

адаптивный след от негатрона побывавшего во включенном состоянии, т. е. не все окружение (смежные включенные негатроны) окажется выключенным. Этот адаптивный след снижает порог включения негатрона. Иными словами, если элемент в общем случае (фрагмент) был переведен в некоторое потенциальное состояние, а затем выведен из этого состояния, то повторный переход в это состояние облегчается, так как снижены барьеры, разделяющие теперь уже два состояния.

Практические значения порогового тока первичного включения некоторого негатрона сети составляло в наших опытах значение 6 мА, в то время как повторное включение осуществлялось током лишь 2.5 мА. Ток повторного включения зависит от "силы" адаптанта, остающегося в системе, т. е. элемент может быть переведен в чувствительное состояние. Этот простой эффект по существу есть проявление действия аттрактора. В более общем случае созданное с помощью внешних сигналов потенциальное состояние части узлов может быть "укреплено" в системе, например с помощью генератора шумового сигнала. Возникающий адаптант с комплементарными свойствами обеспечивает снижение барьеров коллективного переключения, что может дать эффект избирательного переключения состояния сети.

г) **Д о м е н и з а ц и я и о п о р н о с т ь в п о т е н ц и а л ь н ы х п е р е к л ю ч е н и я х.** Этот эффект проявляется в следующем эксперименте. Если произвести одновременное переключение потенциалов нескольких узлов (в наших опытах 2–3 узлов), сохраняя при этом распределение потенциалов между ними неизменным, а затем вернуть систему в исходное состояние и повторить операцию многократно, то возникает эффект взаимозавязки потенциалов узлового фрагмента. Эта взаимозавязка означает, что при изменении потенциалов лишь части узлов изменяются потенциалы остальных узлов фрагмента. При проведении эксперимента предвзвешенно убеждались, что до операции, приводящей к взаимозавязке потенциалов, взаимные потенциалы выбранного фрагмента не сохраняются при воздействии на часть его узлов.

Вычислительное моделирование показало, что самосвязка (доменизация) вызвана уменьшением избыточных токов в пределах домена, в то время как в области, ограничивающей домен, избыточные точки велики и, следовательно, имеется предрасположение к переключениям.

Таким образом, возможна консервация отдельных областей сетевой системы, которая дает возможность переключения фрагментов. Ясно, однако, что переключение потенциалов фрагмента (домена) требует потенциальной опорности на другой фрагмент, не испытывающий при приложениях сигнального напряжения переключений, т. е. имеющего высокие токовые барьеры переключения.

д) **З а щ и т н о е п е р е м е щ е н и е и н ф о р м а ц и о н н ы х е д и н и ц.** Этот эффект демонстрирует рис. 5, на котором приведены в условном

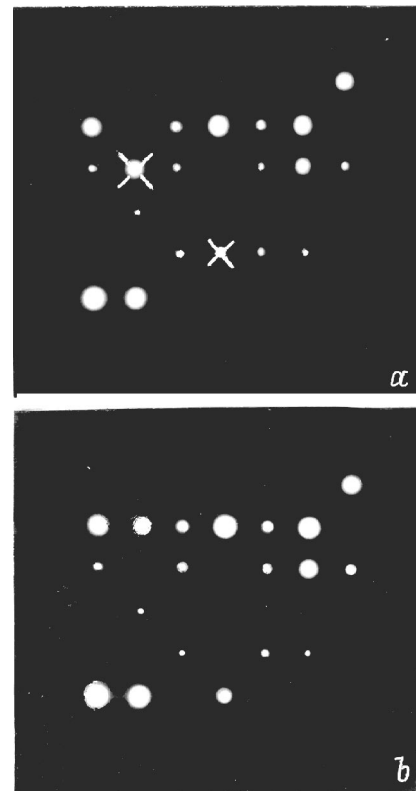


Рис. 5. Эффект защитного перетекания информационных единиц. *a* — исходное потенциальное состояние негатронов сети; *b* — результат действия коротких замыканий.

изображении потенциальные состояния вертикальных ветвей сети (свечение светодиода означает включенное состояние негатрона). Это состояние (например, рис. 5, *a*) обеспечивает некоторую разность потенциалов между верхними и нижними узлами сети, которая для приведенного потенциального распределения равнялась V . Если создать короткое замыкание негатронов отмеченных крестиками на фото, то произойдет их выключение, однако при этом выключается смежный по вертикали негатрон (рис. 5, *b*), что сохраняет контролируемое межузловое напряжение.

3. О возможности создания материалов с электрической многоустойчивостью

Сетевой принцип, т. е. случайный характер межэлементной связности обеспечивает большую конструктивно-технологическую степень свободы. В пределе это может быть уже не конструкция из негатронных элементов, а материал (среда) со статистическим соединением элементов (например, зерен, в которых проявляются негатронные свойства).

В наших исследованиях была создана модель материала, являющая собой случайные соединения пар встречно-согласно включенных GaAs туннельных диодов. При

создании квазиоднородных токовых условий на противоположных границах модели и введении сигнальных электродов в произвольные части сети наблюдалась потенциальная многоустойчивость, адаптивное снижение порога возбудимости и другие отмеченные ранее свойства. Отмечалось также накопительное свойство от многих импульсных токовых воздействий. Встречно-согласное включение туннельных диодов по существу моделировалось зерно полупроводника с мелким приповерхностным туннельным $p-n$ -переходом. Кстати, имеется сообщение о возможности создания туннельных $p-n$ -переходов диффузионным способом [7].

Было также проведено технологическое исследование, направленное на создание керамического материала с электрической многоустойчивостью. Материал представлял собой зерна кремния n -типа электропроводности с мелким приповерхностным $p-n$ -переходом, который образовывался вследствие диффузии акцепторов (бора) из стеклообразного связующего состава SiO_2 (5% wt), PbO (80% wt), V_2O_5 (15% wt). Количество стеклообразующей смеси выбиралось с учетом возможности электрического контактирования кремниевых зерен и составляло 10% wt. Таблетки толщиной 0.5 мм и диаметром 8 мм, полученные прессованием порошка кремния n -типа (средний диаметр зерен $\sim 5 \mu\text{m}$) со стеклообразующим наполнителем и органическим связующим, обжигались при температуре 1200°C в течение 5–10 min. Мелкий $p-n$ -переход необходим для предотвращения токопрохождения по приповерхностному сильнопроводящему p^+ -слою.

Для изучения свойств керамики на одной из поверхностей таблетки создавалось множество металлических контактов диаметром 0.5 мм и зазором между ними $\sim 0.1 \text{ mm}$. Типичные вольт-амперные характеристики, полученные при пропускании тока между двумя смежными контактами, приведены на рис. 6, а. Как видно из рисунка, материал проявляет негатронные свойства. Напряжение пика на S -складке ВАХ снижается при уменьшении зазора между электродами. ВАХ имеет симметрию, т.е. элемент неполярнен.

Предположительный механизм возникновения отрицательного дифференциального сопротивления состоит в следующем. При точечном межзеренном контактировании каждое зерно может рассматриваться как p^+-n-p^+ -структура, в которой могут проявляться транзисторные качества. При этом потенциал "базы" является плавающим. При превышении некоторого напряжения может возникнуть пробой в области обратнорасположенного $p-n$ -перехода, при этом может проявляться положительная токовая обратная связь, свойственная транзисторам с плавающим потенциалом базы. По-видимому, в системе имеет место смешанный тип пробоя — лавинно-тепловой. При больших токах может иметь место термисторный эффект. Имеются свидетельства шнурования тока в керамике. Например, может быть реализовано конкурентное переключение тока при его протекании через один общий и два смежных электрода.

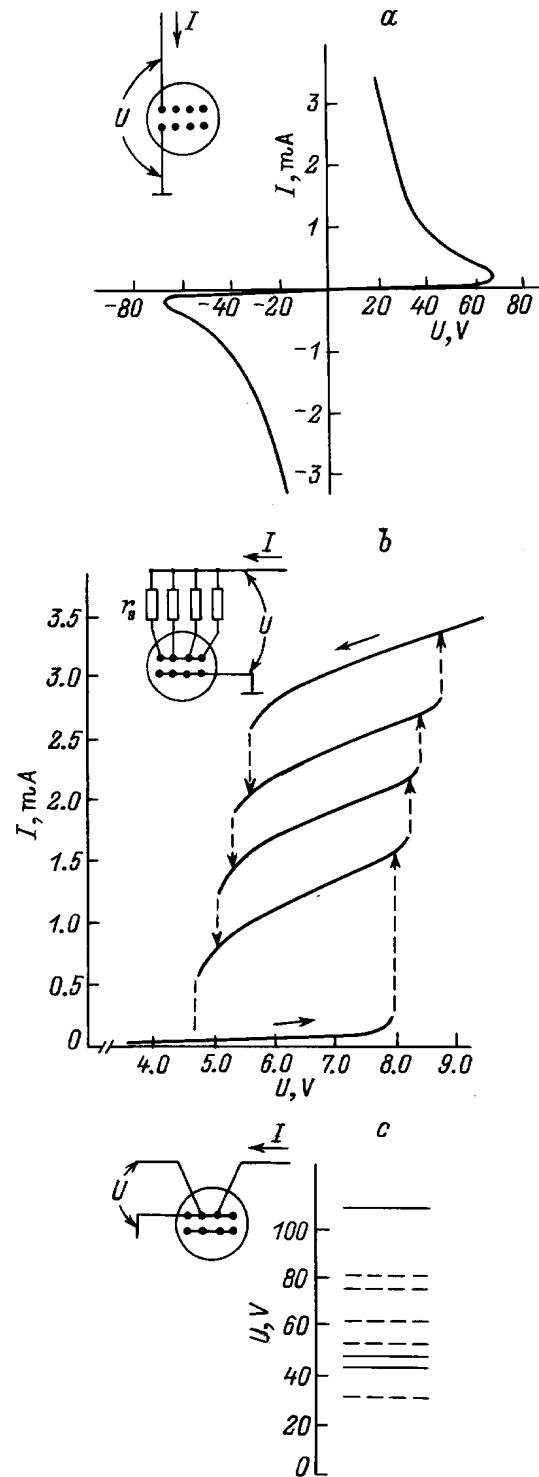


Рис. 6. Электрические свойства керамического материала на основе кремния. а — типичная ВАХ, полученная при пропускании тока через два смежных электрода на поверхности таблетки; б — токовая многоустойчивость в параллельной системе с резистивным ограничением тока; в — потенциальная многоустойчивость, возникающая при приближении тока к критическому значению (сплошные линии отмечают устойчивые, а штриховые — относительно неустойчивые потенциальные состояния).

Электрическая токовая многоустойчивость могла быть обеспечена при создании складки на ВАХ с помощью резистивного ограничения тока. Для этого включали между электродами резисторы или создавался резистивный слой по толстопленочной технологии. Типичная ВАХ в этом случае представлена на рис. 6, *b*, на котором видна токовая многоустойчивость в параллельно соединенных 4 элементах с резистивным ограничением тока.

Несколько неожиданным оказалось проявление потенциальной многоустойчивости при подаче напряжения между двумя отдаленными электродами, между которыми находился третий электрод, на котором регистрировался потенциал. Возникал своеобразный делитель напряжения. При подаче напряжения на крайние электроды, близкого к пиковому, но не превышающего его, отмечалась возможность изменения потенциала среднего электрода внешним токовым воздействием. Остаточные значения потенциалов отличались различной мерой устойчивости. В ряде случаев отмечался самопроизвольный переход в новое потенциальное состояние. Но, пожалуй, наиболее интересным оказалось проявление аттрактивного действия, т.е. самопроизвольное переключение из относительно малоустойчивых в то стабильное потенциальное состояние, в котором система долго пребывала (с течение нескольких минут). В объяснении этого эффекта не исключается возможность инжекции горячих носителей в диэлектрическое связующее, что может оказаться адаптивным следом токового канала. Заметим, что этот вопрос, однако, требует особого изучения.

Заключение

Модельные исследования и полученные опытные образцы материала еще, впрочем, далекого по своим свойствам от возможностей его практического использования, возможно, открывают новый класс материалов — технологически интегрированные сетевые системы. Предрасположения к поиску подобных материалов (сред) в свое время привели к опытам с порошками из проводящих частиц (электрокогезионные среды). Диодный вариант старого прибора — когерера [7] использовался для приема радиосигналов. Однако, как показали более детальные исследования, в электрокогезионной среде под влиянием токопрохождения возникает хорошо геометрически оформленная система электрокогезионных коммуникаций, способная к ветвлениям, эволюционным адаптивным изменениям [3]. Более того, была продемонстрирована возможность обучения подобных сред условной ответной реакции [8].

Вполне возможно, что электрокогезионная среда есть праобраз будущих материалов (“когеритов”), в которых информационный сигнал участвует в становлении условной конструкции, т.е. внутренней упорядоченности среды, обеспечивающей ее “воспитуемую” реактивность. Можно ожидать появления сред с ритмической активностью, существенно обогащающей возможности передачи

сигналов среде с их внутренним преобразованием в ритмические моды. Иерархическая эволюционная динамика подобных сред [9] и связанное с нею развитие модальностей, образование консервативных областей ритмического действия (ядер), частотное размежевание областей и другие качества в их практических приложениях [10] могут способствовать становлению нового направления в электронном материаловедении — синергетические материалы с адаптивными свойствами.

Авторы выражают благодарность В.М. Пасюте за помощь в исследовании свойств керамического материала.

Список литературы

- [1] *Haken H.* Neural and Synergetic Computers / Ed. H. Haken. Berlin: Springer, 1988. 215 p.
- [2] *Kohonen T.* Self-Organization and Associative Memory. Berlin; Heidelberg; New York; Tokyo: Springer Verlag, 1984. 255 p.
- [3] *Кальнин А.А.* // Петербургский журнал электроники. 1993. № 1. С. 36–55.
- [4] *Бочкарева Т.Г., Митюрева И.А.* Экспертная система на порогово-накопительных элементах // Изв. СПбГЭТУ. 1994. № 471. С. 61–63.
- [5] *Матханов П.Н.* Основы анализа электрических цепей. Линейные цепи. М.: Высшая школа. 1972. С. 336.
- [6] *Ивасквич Ю.Л.* Принципы построения многозначных физических схем. Киев: Наукова думка, 1971. С. 316.
- [7] *Branly E.* Variations de Conductibilite Sous Diverses Influences Electriques. Comptes Rendus. T. CXI. N 21. Paris: Gauthier, 1890.
- [8] *Бычков М.Ю., Варшбургер М., Кальнин А.А.* // Изв. СПбГЭТУ. 1993. № 457.
- [9] *Николис Дж.* Динамика иерархических систем. Эволюционное представление. М.: Мир, 1989. 486 с.
- [10] *Кабанов Д.А.* Функциональные устройства с распределенными параметрами. Основы теории и расчета. М.: Сов. радио, 1979. 450 с.