

# Отклик полупроводниковых нелинейных цепей на внешние возмущения

© К.М. Алиев, И.К. Камиллов, Х.О. Ибрагимов, Н.С. Абакарова<sup>¶</sup>

Институт физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского научного центра Российской академии наук, 367003 Махачкала, Россия

(Получена 10 апреля 2014 г. Принята к печати 7 июля 2014 г.)

Экспериментально исследованы процессы переноса тока в цепях, составленных из нелинейных полупроводниковых элементов с отрицательной дифференциальной проводимостью  $N$ -типа, и их отклик на внешнее гармоническое и шумовое возмущение большой амплитуды. Обнаружены многозначности на токовых ветвлениях и участки с абсолютной отрицательной проводимостью на вольт-амперных характеристиках этих цепей. При шумовом воздействии определенного спектрального состава и интенсивности  $N$ -участки токовых ветвлений на вольт-амперных характеристиках цепей полностью сглаживаются. В прикладном аспекте полученный результат можно использовать для снятия стреляющего (firing) режима в возбужденных нейронных сетях.

## 1. Введение

В настоящее время интенсивно исследуются нелинейные цепи, состоящие из  $n$  последовательно соединенных полупроводниковых структур с отрицательными дифференциальными сопротивлениями (ОДС) [1,2]. Такие цепи при приложении электрического напряжения проявляют свойства, присущие сверхрешеткам, в виде широкого комплекса пространственно-временных структур и демонстрируют соответствующие им бифуркационные сценарии, приводящие к явлениям синхронизации или ветвлениям тока в данной цепи. Было показано [1,2], что электронный перенос в сверхрешетках или в последовательности квантовых ям может быть аппроксимирован эквивалентной цепью, состоящей из последовательно соединенных туннельных диодов. Эти исследования имеют важные прикладные аспекты, касающиеся широкого круга проблем: от динамики нейронных систем до мультисоединений солнечных батарей, запоминающих устройств с произвольным порядком выборки, цифровых логических систем и т.д. [1–3]. В модели, развитой в [1] для нелинейной цепи, содержащей ряд последовательно соединенных элементов с ОДС, показано, что разнородность свойств составляющих элементов приводит к когерентности в цепях токов, протекающих через элементы, что ведет к множеству ветвей на общей вольт-амперной характеристике (ВАХ) и неоднородному распределению напряжения на отдельных элементах. Причем в зависимости от параметров диодов в цепи, а также от длительности и скорости нарастания пилообразного напряжения количество ветвей на ВАХ может меняться. В цепи туннельных диодов в режиме генерации при соответствующем подборе нагрузочного сопротивления и уровня приложенного электрического поля был обнаружен [2] комплекс бифуркационных сценариев с нарушающими симметрию переходами, которые производят множество неподвижных точек от синхронизаций. В последующем через вырождение бифуркаций нулевого собственного

значения возникают мультиустойчивые токовые ветви в цепи нелинейных элементов.

Ранее нами при исследовании отклика полупроводниковых структур с нелинейными свойствами на внешние гармонические и шумовые возмущения большой амплитуды был обнаружен целый ряд неординарных явлений: многозначности на ВАХ, эффект абсолютного отрицательного сопротивления, ступенчатые осцилляции тока,  $Z$ -образные участки на ВАХ туннельных диодов [4–9]. В данной работе приведены результаты экспериментального изучения механизмов проводимости нелинейных цепей, состоящих из туннельных диодов серийного производства и общего применения, и их отклика на внешние гармонические (до 100 МГц) и шумовые (со спектральной плотностью до 7 МГц) возмущения большой амплитуды.

## 2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Схема измерений (рис. 1) включает источник постоянного тока с низким выходным сопротивлением или генератор сигналов специальной формы ( $G_1$ ), токоснима-

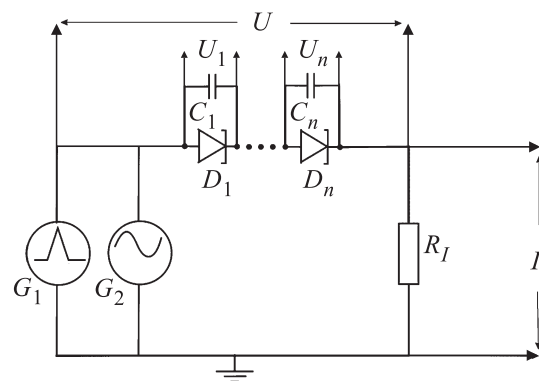
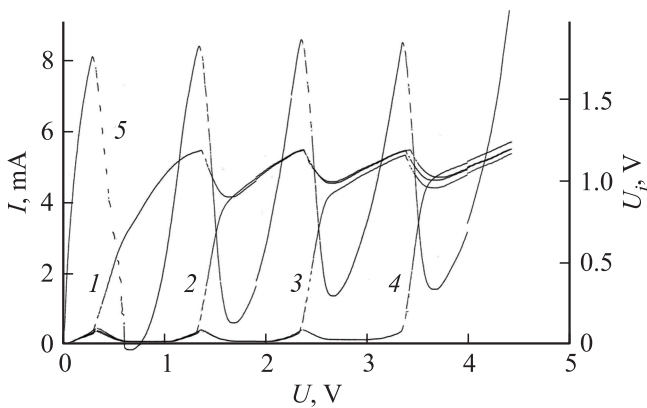


Рис. 1. Схема измерений.

<sup>¶</sup> E-mail: abakarova\_naida@mail.ru



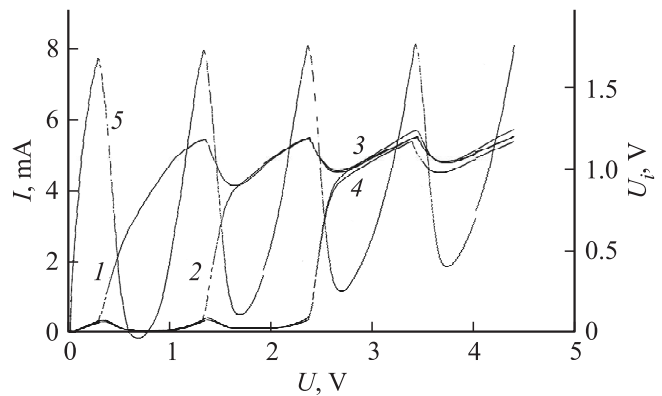
**Рис. 2.** Изменение потенциала  $U_i$  на диодах — кривые 1, 2, 3, 4 (числа соответствуют нумерации диодов в цепи) и общая ВАХ цепи из четырех диодов — кривая 5.

ющее сопротивление  $R_l = 3-100$  Ом, цепь из  $n$  туннельных диодов, многофункциональный генератор Agilent 81150 ( $G_2$ ). ВАХ цепи измерялась на постоянном или пилообразном напряжении смещения и регистрировалась двухкоординатным самопишущим потенциометром, а в импульсном режиме — четырехканальным осциллографом Tektronix MSO 4034. Длительность напряжения смещения  $T_U$  в цепи изменялась в широком диапазоне 10 мс–10 с. ВАХ исследованных диодов, полученные как в импульсном режиме, так и на постоянном токе, показали их полную идентичность и отсутствие каких-либо различий, связанных с джоулевым разогревом. Исследуемые цепи составлялись из отобранных по наиболее близким параметрам туннельных диодов. Падение напряжения на каждом диоде регистрировалось с помощью дифференциальных усилителей. Разнородность свойств элементов цепи по емкости сводилась к минимуму подбором одинаковых емкостей, которые подключались параллельно диодам, а неоднородность распределения напряжения на отдельных элементах цепи — тщательным подбором самих элементов по наилучшему совпадению ВАХ отдельных диодов. Сформированная подобным образом цепь при приложении напряжения смещения представляет собой нелинейную динамическую систему, подверженную реакции связи по общему напряжению.

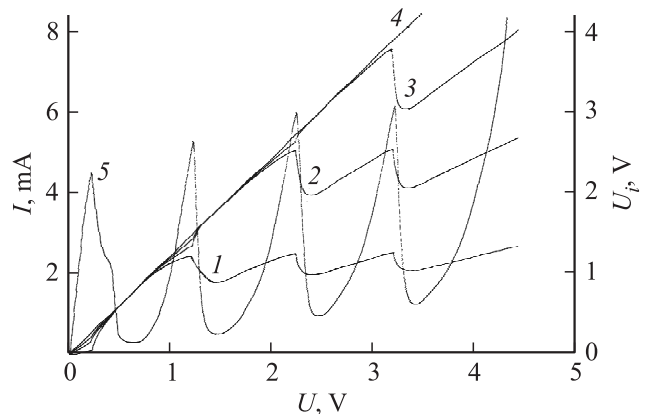
На рис. 2 представлены ВАХ и падение напряжения на каждом диоде отдельно с ростом величины смещения, приложенного к цепи, при  $n = 4$ , нагрузочном сопротивлении 20 Ом, длительности линейно нарастающего напряжения  $T_U = 10$  с и отсутствии внешнего возмущения. Проявляющиеся экспериментально токовые ветви и изменение потенциала на отдельных диодах характерны для подобных цепей, но последовательность включения самих диодов не всегда однозначна и существенно зависит от параметров диодов. Замечено, что при прочих равных условиях первым включается диод с малой собственной емкостью. Кроме того, измерения показали, что диоды могут включаться в любой последователь-

ности в зависимости от их характерных параметров. Разброс параметров диодов играл своего рода роль шумового фона в этой нелинейной цепи.

При совпадении потенциалов двух диодов при одинаковых смещениях, что контролировалось по величине напряжения, число ветвей на ВАХ не уменьшалось. Так, на рис. 3 представлен случай, когда диоды переключаются в последовательности 1–2–(3,4). По величине потенциала на отдельных диодах можно оценить разброс параметров диодов в данной цепи. Если фиксировать потенциал на диодах в виде суммы падений напряжений  $V_1$ ,  $V_1 + V_2$ ,  $V_1 + V_2 + V_3$  и  $V_1 + V_2 + V_3 + V_4$  (рис. 4), то изменение и рост суммарного падения напряжения на них при линейном увеличении приложенного к цепи смещения в динамике демонстрируют амплитудные и временные изменения, приводящие к ветвлению токов. Экстремумы на ВАХ совпадают с соответствующими изменениями потенциала на диодах, причем число выбросов на первом диоде — 3, на первом и втором — 2, на первом, втором и третьем — всего 1. Амплитуда



**Рис. 3.** Изменение потенциала  $U_i$  на диодах — кривые 1, 2, 3, 4 (случай совпадения потенциалов на 3 и 4 диодах) и общая ВАХ цепи из четырех диодов — кривая 5.



**Рис. 4.** Изменение потенциала  $U_i$  на диодах: кривая 1 — на диоде 1; кривая 2 — на диодах 1 и 2; кривая 3 — на диодах 1, 2 и 3; кривая 4 — на диодах 1, 2, 3 и 4 и кривая 5 — общая ВАХ цепи из четырех диодов.

изменения потенциала с ростом числа диодов, как и ожидалось, пропорционально увеличивается. Когда в цепь подключены  $n$  диодов, и ВАХ цепи имеет  $n$  ветвей, практически невозможно по ВАХ идентифицировать туннельные и диффузионные вклады общего тока в цепи, так как диффузионная часть тока предыдущего диода совпадает с туннельной составляющей для последующего.

Как отмечалось, при заметном разбросе параметров элементов, составляющих цепь, порядок включения диодов может быть произвольным. В том числе, встречаются случаи совпадения переключения потенциалов на двух диодах при одном и том же по величине и порогу смещении в цепи и при самом тщательном подборе величин емкостей, включенных параллельно диодам. Разброс параметров диодов играет более существенную роль в поведении цепи, чем подбор включенных параллельно диодам емкостей. При увеличении числа диодов до 8 поведение потенциала становится более разнообразным, хотя число ветвлений тока на ВАХ всегда равно числу диодов в цепи.

Если ВАХ отдельных диодов на падающем  $N$ -участке имеют одну или более ступенек, обычно связанных с различными уровнями примесей и их распределением в  $p$ - $n$ -переходе, то при соединении таких диодов в цепь последовательно, эти ступени сглаживаются или совершенно исчезают, что обусловлено самоорганизующей и фильтрующей ролью суммарных параметров сопротивлений, емкостей и индуктивностей цепи. Замечено, что с добавлением в цепь последующего диода пиковые значения тока  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  первого диода существенно смещаются в область больших значений по оси напряжений на ВАХ.

Было изучено влияние длительности пилообразного напряжения в пределах 10 мс–10 с на форму и число ветвей на ВАХ. В отличие от результатов теоретических исследований и численного эксперимента [1] в приведенных выше пределах длительностей пилообразного напряжения в нашем натурном эксперименте на трех группах различных по своим функциональным назначениям и параметрам диодных цепей не удалось обнаружить уменьшение числа ветвей на ВАХ цепи с уменьшением длительности импульса пилы вплоть до 10 мс. По данным работы [1], подобные цепи с 8 диодами уже при  $T_U = 100$  мс не проявляют токовые ветвления, и общая ВАХ для всей цепи имеет такую же форму, как и для единичного элемента во всем интервале приложенных к цепи напряжений смещения. В отличие от случая [2], когда диоды в цепи находятся в режиме генерации, и с ростом смещения на них проявляется комплекс бифуркационных сценариев, приводящих через вырождение нулевого собственного значения к мультиустойчивым токовым ветвям в цепи нелинейных элементов, в модели [1] считается, что разнородность свойств элементов в общей цепи приводит к формированию согласованности или когерентности токов, протекающих через отдельные элементы, и неоднородное распределение напряжения

на отдельных элементах приводит к ветвлению тока. При условии идентичности всех элементов, что означает отсутствие изменений емкостей и собственных ВАХ, считается, что смоделированная кривая ВАХ для цепи туннельных диодов будет кривой той же формы, что и одиночного туннельного диода, и токовые ветви в цепи не наблюдаются. В случае, когда изменение емкостей вводилось в модель в виде  $C_j = C_0 + \delta C r_j$ , где  $j = 1, 2, \dots, n$ ,  $\delta C$  — относительное максимальное значение флуктуации,  $r_j$  — независимые случайные числа, равномерно распределенные на  $[0,1]$ , токовые ветви на ВАХ проявляются. Другой способ получить токовые ветви на ВАХ цепи — введение флуктуаций в ВАХ в виде  $I_j = I_0(1 + dI \varepsilon_j)$ , где  $I_j$  — электрический ток на  $j$  элементе,  $I_0$  — электрический ток в цепи,  $\varepsilon_j$  —  $n$  независимых нормально распределенных чисел, а  $dI = 0.1$ , что является типичным значением для реальных диодов. Если в системе имеет место малый разброс параметров, то невзаимодействующее состояние в цепи связано с профилем поля, который близок к однородному. Когда взаимодействие отлично от нуля, система отклоняется от несвязанного состояния, и профиль поля становится неоднородным. Такое поведение в модели [1] характеризуется параметром полевой неоднородности  $r_{\max}$ , определяемым как

$$r_{\max} = \max\{r(t) : 0 < t < T\},$$

где

$$r(t) = \frac{1}{n} \sum_j^n \left( \frac{v_j - v_j^{(0)}}{v_j^0} \right)^2. \quad (1)$$

Величина  $r(t)$  выражает уровень неоднородности поля в цепи при длительности пилообразного напряжения  $T$ ,  $v_j$  — смещение на  $j$  элементе цепи, а  $r_{\max}$  задает максимальную степень неоднородности на протяжении всего процесса по времени  $T$  и привязывает единичное значение ко всему процессу. Таким образом, для невзаимодействующего состояния  $r_{\max} \rightarrow 0$ , а когда влияние связывающего члена велико, допускается значение  $r_{\max}$  порядка 1. В результате, когда время  $T$  большое, система демонстрирует токовые ветви на статических ВАХ. С уменьшением длительности элементы цепи частично демонстрируют когерентность. При быстром изменении  $T$  элементы цепи не связаны и проходят через область ОДС на ВАХ одновременно, и ВАХ всей цепи повторяет ВАХ индивидуального элемента. Расчеты показывают, что переход от несвязанного состояния к когерентному поведению имеет место при временах  $T$  от 100 мкс до 10 мс, значительно превышающих характерную временную постоянную  $RC$ , связанную с индивидуальным элементом, т. е.  $\tau = CdI_0/dv \approx 2$  мс.

Как отмечено выше, в натурном эксперименте в цепях с 4 и 8 диодами при длительности роста пилообразного напряжения в пределах 10 мс–10 с нам не удалось обнаружить изменение числа токовых ветвей на ВАХ.

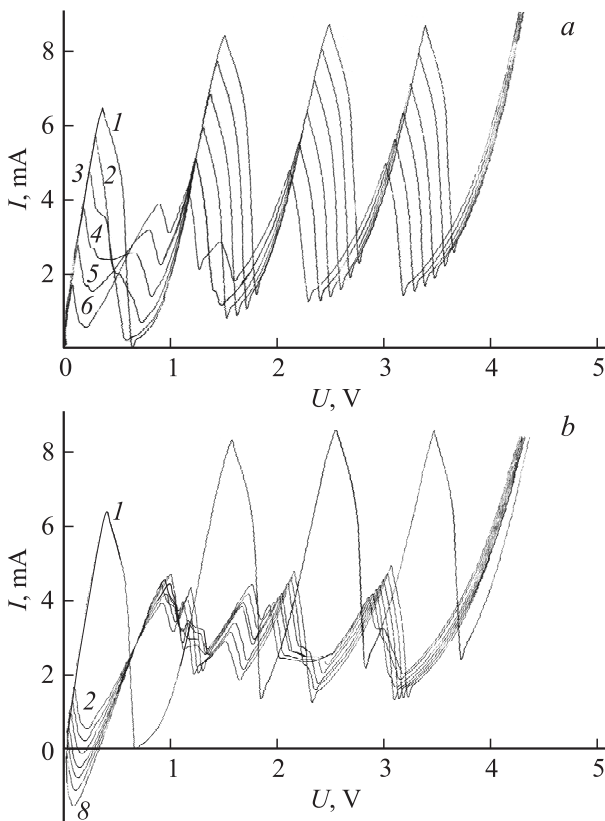
Так как исследуемые полупроводниковые нелинейные цепи могут найти важные прикладные применения,

мы исследовали влияние на проводимость таких цепей внешних гармонических и шумовых возмущений большой амплитуды. На рис. 5, *a, b* приведены ВАХ для цепи из 4 диодов при наложении гармонического сигнала с частотой 50 МГц и увеличении его амплитуды до 2.1 В. Выраженными характерными особенностями ВАХ при этом являются:

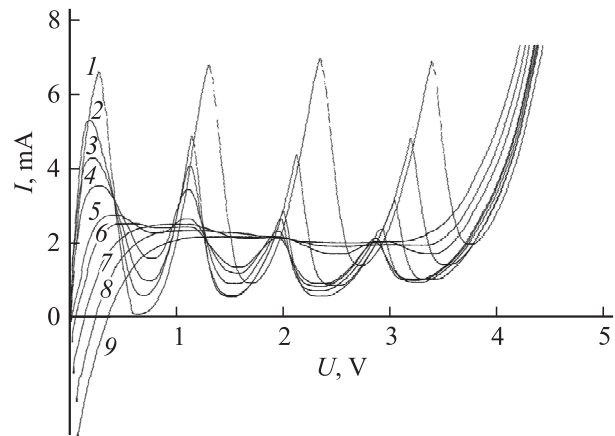
- существенное уменьшение амплитуды токовых ветвей;
- возникновение многозначностей на ВАХ, т.е. увеличение числа падающих  $N$ -участков;
- наибольшее влияние возмущений на первую ветвь ВАХ;
- возникновение на первой ветви ВАХ участка с абсолютной отрицательной проводимостью.

Обнаружены случаи изменения знака сопротивления 2 раза, т.е. 2 раза на одной ВАХ наблюдался эффект абсолютной отрицательной проводимости.

При наложении шумового возмущения со спектральной плотностью до 7 МГц и увеличении интенсивности ВАХ исследуемых цепей демонстрируют совершенно неожиданные результаты (рис. 6):



**Рис. 5.** *a* — ВАХ цепи из четырех диодов при воздействии гармонического сигнала с частотой 50 МГц при увеличении его амплитуды  $U$ , В: 1 — 0, 2 — 0.3, 3 — 0.6, 4 — 0.9, 5 — 1.2, 6 — 1.5; *b* — ВАХ цепи из четырех диодов при воздействии гармонического сигнала с частотой 50 МГц при увеличении его амплитуды  $U$ , В: 1 — 0, 2 — 1.5, 3 — 1.6, 4 — 1.7, 5 — 1.8, 6 — 1.9, 7 — 2.0, 8 — 2.1.



**Рис. 6.** ВАХ цепи диодов при воздействии шумового сигнала со спектральной плотностью 6.5 МГц с ростом его интенсивности  $U$ , В: 1 — 0, 2 — 0.25, 3 — 0.5, 4 — 0.64, 5 — 0.88, 6 — 1.60, 7 — 2.40, 8 — 3.85, 9 — 4.20.

- амплитуда токовых ветвей полностью подавляется;
- вместо первой ветви на ВАХ появляется участок с абсолютной отрицательной проводимостью;
- остальная часть цепи проявляет только постоянную составляющую, приблизительно параллельную оси напряжений во всем интервале приложенных смещений.

Высокочастотное воздействие в широком интервале амплитуд и частот (рис. 5) приводит к существенному уменьшению токовых ветвей на ВАХ исследуемых модельных цепей, но не к полному их подавлению, как в случае шумового воздействия.

Обнаруженное при шумовом воздействии подавление токовых ветвей может найти весьма интересное и важное применение для нейронных систем. Известно [1–3], что аналогичные токовые ветви образуются в нейронах при их возбуждении инъекционными токами. Причем при промежуточных инъекционных токах возникает так называемый „стреляющий“ (firing) режим, который играет критическую роль в подобных системах. Если с помощью шумов определенного спектрального состава и интенсивности удастся погасить такой критический „стреляющий“ режим в нейронных сетях, как это наблюдается в полупроводниковых цепях, то станет очевидна важность полученного в полупроводниковых нелинейных цепях результата.

### 3. Заключение

Итак, каждая токовая ветвь на ВАХ нелинейной цепи туннельных диодов соответствует прохождению тока через падающий участок отрицательного дифференциального сопротивления отдельного диода. Порядок в последовательности прохождения через область ОДС определяется малым разбросом параметров каждого из диодов.

При внешнем высокочастотном гармоническом воздействии такие цепи проявляют многозначности на ВАХ, эффект абсолютной отрицательной проводимости и сильную деформацию самих ВАХ.

При шумовом воздействии наблюдается эффект абсолютной отрицательной проводимости и полное подавление токовых ветвей на ВАХ, что может найти прикладное применение в области нейронных систем.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 12-02-96500-р\_юг\_а.

## Список литературы

- [1] H. Xu, S. Teitsworth. *J. Appl. Phys.*, **108**, 043 705 (2010).
- [2] H. Heinrich, T. Dahms, V. Flunkert, S. Teitsworth, E. Shöll. *New J. Phys.*, **12**, 113 030 (2010).
- [3] E.M. Izhikevich. *Dynamical Systems in Neuroscience: The Geometry of Excitability and Bursting* (Cambridge, London: the MIT Press, 2007).
- [4] K.M. Aliev, I.K. Kamilov, Kh.O. Ibragimov, N.S. Abakarova. *Sol. St. Commun.*, **148**, 171 (2008).
- [5] К.М. Алиев, И.К. Камиллов, Х.О. Ибрагимов, Н.С. Абакарова. *ФТП*, **43**, 517 (2009).
- [6] К.М. Алиев, И.К. Камиллов, Х.О. Ибрагимов, Н.С. Абакарова. *ЖТФ*, **81**, 141 (2011).
- [7] К.М. Алиев, И.К. Камиллов, Х.О. Ибрагимов, Н.С. Абакарова. *Прикл. физика*, **1**, 126 (2011).
- [8] К.М. Алиев, И.К. Камиллов, Х.О. Ибрагимов, Н.С. Абакарова. *Письма ЖТФ*, **37**, 42 (2011).
- [9] К.М. Алиев, И.К. Камиллов, Х.О. Ибрагимов, Н.С. Абакарова. *ФТП*, **46**, 1082 (2012).

Редактор Т.А. Полянская

## Response of semiconductor nonlinear circuits on external perturbation

*K.M. Aliev, I.K. Kamilov, Kh.O. Ibragimov, N.S. Abakarova*

Amirkhanov Institute of Physics,  
Dagestan Scientific Centre,  
Russian Academy of Sciences,  
367003 Makhachkala, Russia

**Abstract** In the model circuits formed from nonlinear semiconductor elements in series that possess  $N$ -type negative differential resistance the current transition processes have been investigated and response of these nonlinear circuits on external harmonic and noise perturbations with large amplitude have been experimentally studied. Multiplicities on the current branches and segments on the current-voltage characteristic with absolute negative resistance have been found. Experimentally shown, the external noise perturbation of fitting spectral density and intensity applied to circuit completely smooth  $N$ -sections on current-voltage characteristics. This result can be applied to suppress the firing mode occurring in the excited neural network.