

УДК 621.315.592

## Отклик нелинейной системы (на примере туннельного диода) на внешние возмущения большой амплитуды

И. К. Камиров, К. М. Алиев, Х. О. Ибрагимов, Н. С. Абакарова

*Экспериментально исследовано влияние внешних когерентных или шумовых возмущений большой амплитуды на поведение динамических и статических вольтамперных характеристик туннельных диодов. Показано, что при подборе соответствующей частоты с ростом амплитуды внешнего когерентного сигнала на вольтамперных характеристиках туннельных диодов появляются многозначности и абсолютное отрицательное сопротивление. Шумовое воздействие приводит к подавлению отрицательного дифференциального сопротивления N-типа.*

PACS: 72.20. Ht, 72.20.+m

*Ключевые слова:* нелинейная система, внешние возмущения, большая амплитуда.

### Введение

Интерес к изучению отклика нелинейных систем на внешние возмущения вызван не только обнаружением стохастического резонанса в туннельных диодах [1, 2] и детерминированного стохастического резонанса в полупроводниковых бистабильных системах [3], а также интенсивными поисковыми работами в области пространственно-временной нелинейной динамики, хаотического состояния и его контроля, включая и низкоразмерные структуры, такие как резонансные туннельные диоды [4] и др., в которых обнаружен эффект абсолютного отрицательного сопротивления (АОС).

О наблюдении эффекта АОС в полупроводниках, предсказанного Эрлбахом [5], по-видимому, впервые сообщалось в работе [6]. В работе [7] экспериментально обнаружено, что туннельный контакт между сверхпроводниками с неравновесной функцией распределения квазичастиц проявляет АОС. Теоретический анализ проводимости сверхрешетки в условиях воздействия нелинейной электромагнитной волны показал [8], что при напряженности поля этой волны  $E \approx 1,8 \cdot 10^3$  В/см на вольт-амперной характеристике (ВАХ) появляется участок АОС, как и в работе [9], посвященной ис-

следованию проводимости двухбарьерных гетероструктур в сильном лазерном поле. В статье [10] экспериментально установлено, что в гетероструктурах в сильном магнитном поле электромагнитное излучение приводит к эффекту АОС, теоретически предсказанному в [11]. В работе [12] АОС обнаружено в сверхрешетках в бигармонических полях, т. е. когда поле многочастотное с определенными фазовыми соотношениями между его гармониками.

Несмотря на обилие теоретических и экспериментальных работ механизмы возникновения АОС в неравновесных электронных системах, на наш взгляд, остаются дискуссионными, так как такие состояния являются пространственно неоднородными и обусловлены, возможно, локальным отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС). Не всегда детально определены и экспериментальные условия, при которых возникает АОС в неравновесных системах.

В данной работе предпринята попытка на примере туннельного диода уточнить характер и механизм отклика нелинейной системы на внешние возмущения большой амплитуды.

### Эксперимент

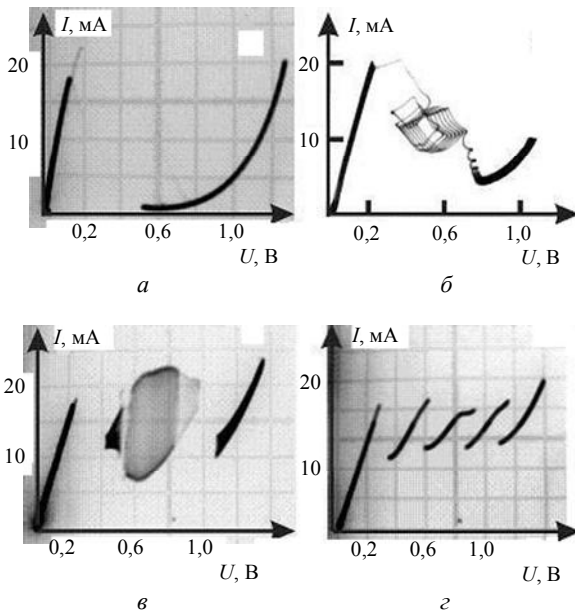
Измерения проводились как в импульсном режиме генератора напряжения, так и на постоянном токе с источником питания с низкоомным выходом. На рис. 1, а приведена типичная ВАХ для туннельного диода в импульсном режиме. Наиболее характерные формы колебаний тока на падающем N-участке ВАХ с ростом величины приложенного к диоду напряжения смещения представляют собой режимы с заострениями (spiking), аналогичные обнаруженным в резонансных туннельных диодах и других бистабильных системах [4].

---

Камиров Ибрагимхан Камирович, директор.  
Алиев Камилль Минкаиллович, зав. лабораторией.  
Ибрагимов Хаджимурат Омарович, научный сотрудник.  
Абакарова Наида Сулеймановна, научный сотрудник.  
Институт физики ДНЦ РАН.  
Россия, 367003, г. Махачкала, ул. М. Ярагского, 94.  
Тел. 8 (8722) 62-66-50. E-mail: khmurat@iwt.ru  
Статья поступила в редакцию 25 апреля 2010 г.

---

© Камиров И. К., Алиев К. М., Ибрагимов Х. О.,  
Абакарова Н. С., 2011



**Рис. 1. Семейство ВАХ туннельного диода в импульсном режиме:**

*a* — без внешнего сигнала; *б* — при наложении внешнего когерентного сигнала с частотой 22 МГц; *в* — 38 МГц; *г* — 94 МГц

Если к диоду, проявляющему *N*-образную ВАХ, представленную на рис. 1, *a*, приложить переменное напряжение высокой частоты и соответствующей амплитуды, то вид ВАХ диода сильно меняется. Так, на рис. 1, *б* приведена восходящая ветвь ВАХ для диода серийного производства при наложении сигнала частотой 22 МГц и амплитудой 30 мВ. На падающем *N*-участке ВАХ диода возникает структура в виде двумерного тора, образующегося вследствие эффекта "захвата частоты" и приводящая к многозначностям на ВАХ как по токам, так и по напряжениям.

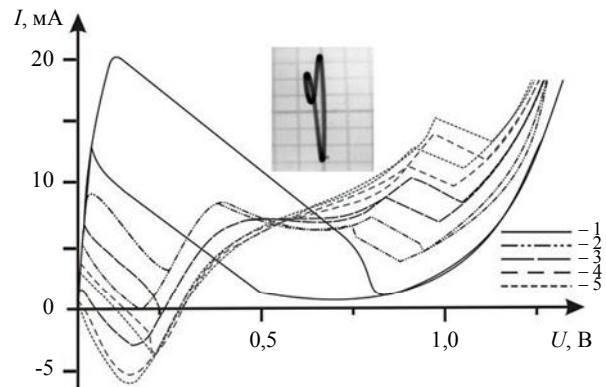
Увеличение частоты высокочастотного (ВЧ) сигнала до 38 МГц приводит к изменению формы структуры на ВАХ и возникновению второго падающего участка *N*-типа на ВАХ (рис. 1, *в*). Наложение высокой частоты на постоянную составляющую тока приводит, в большинстве своем, к двум *N*-участкам на ВАХ. При соответствующем подборе амплитуды и частоты ВЧ-сигнала можно обнаружить 3, 4 и более *N*-участков на ВАХ. Так, на рис. 1, *г* приведен случай с четырьмя падающими участками, соответствующий частоте 94 МГц. Отметим, что при заданной частоте с ростом амплитуды ВЧ-сигнала на ВАХ сначала появляются два *N*-участка, потом три и далее — четыре участка ОДС.

Для исследования процессов переноса тока на постоянном токе при наложении высокой частоты были измерены статические восходящие и нисходящие ВАХ на двухкоординатном самописце. Результаты таких измерений приведены на рис. 2 для частоты ВЧ-сигнала 48 МГц с ростом его ампли-

туды от 0 до 150 мВ. Кривая 1 представляет собой типичную ВАХ для туннельного диода с выраженным гистерезисом на *N*-участке. Увеличение амплитуды ВЧ-сигнала до 50 мВ приводит к резким изменениям на ВАХ диода (кривая 2), которые в основном сводятся к следующим эффектам:

наблюдается значительное уменьшение туннельной и резкий рост диффузионной и избыточных компонент полного тока туннельного диода;

на ВАХ наблюдаются многозначности, т. е. несколько падающих участков *N*-типа ОДС с соответствующими им гистерезисами.



**Рис. 2. Семейство восходящих и нисходящих ветвей ВАХ туннельного диода в прямом направлении по постоянному току при наложении внешнего когерентного сигнала с частотой 48 МГц при увеличении амплитуды:**

1 — 0 мВ; 2 — 50 мВ; 3 — 75 мВ; 4 — 100 мВ; 5 — 150 мВ. На вставке — "режим с заострением"

Дальнейшее увеличение амплитуды ВЧ-сигнала до 80 мВ (кривая 3) приводит к возникновению участка АОС на падающем *N*-участке ВАХ диода, величина которого увеличивается с ростом амплитуды приложенного сигнала (кривые 3 и 4). При амплитуде ВЧ-сигнала 150 мВ падающий *N*-участок полностью находится в области отрицательных токов вплоть до 290 мВ по оси напряжений. Необходимо указать, что область АОС на ВАХ возникает не на всех частотах использованного в эксперименте диапазона ВЧ-сигнала. Остальные участки ВАХ при этом находятся выше оси напряжений, а диффузионные составляющие полного тока диода при этом растут по токам с увеличением амплитуды ВЧ-сигнала.

Анализ простой полуэмпирической модели цепи, содержащей элемент с *N*-образной ВАХ и токоснимающее сопротивление, когда к этой цепи одновременно приложены постоянное  $E_0$  и переменное  $E_m \cos \omega t$  напряжения, показывает, что измеренные значения среднего тока  $\langle j \rangle$  за период колебаний не может привести к эффекту АОС, хотя проводимость диода  $\sigma = \frac{\langle j \rangle}{E_0 + E_m \cos \omega t}$  будет меняться как за счет изменения постоянного на-

пряжения, так и амплитуды выпрямленного переменного напряжения.

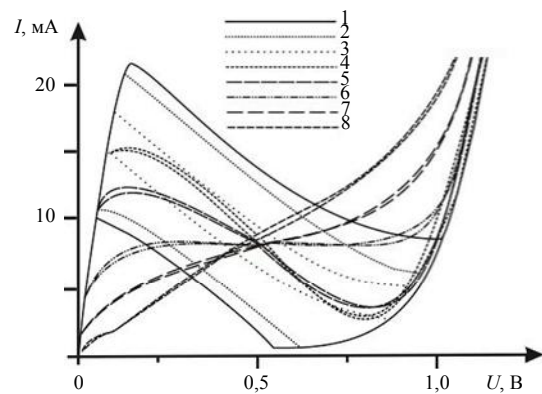
Детальный анализ переходных процессов показал, что АОС на ВАХ диода связано с возникновением динамических структур большой амплитуды (цикла, двумерного тора или более сложных странных аттракторов) на падающем  $N$ -участке вследствие резонансного взаимодействия внешнего сигнала и собственных частот диода, приводящих обычно к режимам с заострениями (см. вставка, рис. 2). Расчеты показывают, что только в этом случае суммарные токи могут привести к эффекту АОС. Возникновение динамической структуры в виде притягивающего множества типа аттрактора при захвате частоты, возможно, связано с сильно неоднородным распределением поля внутри перехода, которое максимально в некоторой плоскости внутри барьера и убывает к его краям [13].

Как показано нами ранее [14], в одной и той же структуре из-за сильно неоднородного распределения поля могут одновременно существовать несколько таких аттракторов. При этом нельзя не учитывать таких сложных процессов, происходящих в туннельном диоде, как изменение расположения уровня Ферми и смещение зон под действием переменного сигнала большой амплитуды. При этом поведение хвостов плотности состояний, возможность частичного снятия вырождения или изменение распределения электрического поля в диоде. АОС в полупроводниковых сверхрешетках в бигармонических полях [12], на наш взгляд, связано именно с механизмом, предложенным нами выше, так как оно возникало в многочастотном поле, в частности, бигармоническом, с определенными фазовыми соотношениями между его гармониками, которые могут привести к эффекту захвата частоты, присущему только сильно неравновесным нелинейным системам, и образованию устойчивых динамических структур на ВАХ.

В работах [13, 14] описан экспериментально обнаруженный эффект возникновения участка ОДС на ВАХ туннельных диодов под воздействием внешнего СВЧ-сигнала (25—140 ГГц) для случаев, когда напряжение смещения на диоде в отсутствие сигнала существенно меньше пикового значения. Причем с ростом мощности СВЧ-сигнала участок ОДС исчезал, а при некоторых его значениях ВАХ диода становилась линейной для любого начального значения тока через диод [15, 16]. В этих исследованиях эффект АОС не был обнаружен.

Авторами также исследовано влияние воздействия шумов со спектральной плотностью до 6,5 МГц и эффективной амплитудой напряжения до 500 мВ на поведение статических ВАХ туннельных диодов. На рис. 3 приведена серия таких ВАХ при увеличении амплитуды шумов от 0 до

300 мВ. При малых амплитудах шумов (до 50 мВ) основной эффект сводится к сужению области гистерезиса на ВАХ, понижению пороговых величин пиковых значений переключения, а также к сильному росту избыточной компоненты полного тока и менее выраженному росту диффузионной компоненты. Дальнейшее увеличение амплитуды приводит к полному исчезновению гистерезиса на  $N$ -участке ВАХ, а начиная с 140 мВ — к исчезновению самого  $N$ -участка. При этом наблюдается резкое уменьшение туннельной составляющей полной компоненты тока и рост диффузионной и избыточной его составляющих. ВАХ диода приобретает вид, близкий к линейному типу. Интересно отметить, что, как и в случае когерентного воздействия, после исчезновения гистерезиса с ростом эффективной амплитуды шумов все кривые ВАХ проходят через небольшую окрестность точки, расположенной внутри области гистерезиса на ВАХ без внешних возмущений. При шумовом воздействии эффект АОС в туннельных диодах не наблюдается вплоть до 500 мВ.



**Рис. 3. Семейство восходящих и нисходящих ВАХ туннельного диода в прямом направлении по постоянному току при наложении шумового сигнала со спектральной плотностью 6,5 МГц при увеличении эффективной амплитуды:**  
1 — 0 мВ; 2 — 15 мВ; 3 — 30 мВ; 4 — 80 мВ; 5 — 125 мВ;  
6 — 150 мВ; 7 — 200 мВ; 8 — 300 мВ

Без детального обсуждения отметим, что обратные ветви ВАХ туннельных диодов также весьма подвержены влиянию внешних возмущений. При малых амплитудах возмущений в случае когерентного воздействия на ВАХ обычно наблюдается незначительное уменьшение проводимости. В этом случае с ростом амплитуды возмущений на обратных ветвях обычно ток резко уменьшается и при некоторых частотах и амплитудах наблюдается  $N$ -образный участок. В случае шумового воздействия с увеличением амплитуды возмущений сопротивление по постоянному току вначале возрастает, далее ток растет ступенчато, и обратная ветвь приобретает  $S$ -образный вид. Кроме того, в диоде, находящемся в разомкнутой по постоянно-

му току цепи, под воздействием когерентного или шумового возмущения возникает значительная статическая ЭДС.

Обнаружена еще одна особенность на ВАХ туннельного диода при воздействии на него когерентного возмущения в частотном диапазоне 83—99 МГц. На восходящей ветви ВАХ, как и в работе [17], при соответствующей амплитуде проявляется участок  $Z$ -типа, который не воспроизводится на нисходящей ветви.

Была сделана попытка использования полученных сложных форм ВАХ и структур на них (артефактов) для практического применения путем наложения в динамическом режиме ВЧ-сигнала с помощью второго генератора в тех же диапазонах частот и амплитуд. Обнаружен целый ряд более сложных и экзотических ВАХ, области усиления, захвата частоты, хаотизации и упорядочения, что может быть использовано в качестве преобразователей частоты и генераторов самых различных сигналов, включая гармонические, релаксационные и хаотические.

### Выводы

В результате экспериментального исследования отклика нелинейных систем (на примере туннельного диода) на внешние когерентные или шумовые возмущения большой амплитуды обнаружен целый ряд неординарных явлений, в том числе:

1. Эффект абсолютного отрицательного сопротивления.
2. Эффект многозначности на ВАХ, т. е. наличие нескольких участков  $N$ — $S$ -типа.
3. Сильная деформация ВАХ, связанная с неоднозначными изменениями туннельной, избыточной и диффузионной компонент полного тока диода, что в различных случаях можно представить в следующем виде:  
при больших когерентных возмущениях резкий рост сопротивления и  $N$ -образный участок на обратных ветвях ВАХ;

при больших шумовых возмущениях резкий рост сопротивления, дальнейшее увеличение амплитуды которых приводит к ступенчатому росту тока, плавно переходящему в  $S$ -образии.

4.  $Z$ -образный участок на прямых восходящих ветвях ВАХ.

5. Появление значительных ЭДС в разомкнутой по постоянному току цепи с туннельным диодом при наложении на нее когерентных или шумовых возмущений большой амплитуды.

Работа выполнена при поддержке гранта  
РФФИ № 06-02-96613 — Юг России.

### Литература

1. Mantegna R. N., Spagnola B.// Phys. Rev. E. 1994. V. 49. P. R1792.
2. Анищенко В. С., Нейман А. Б., Мосс Ф., Шиманский-Гайер Л.// УФН. 1999. № 169. С. 7.
3. Камиллов И. К., Алиев К. М., Ибрагимов Х. О., Абакарова Н. С.// Письма в ЖТФ. 2004. № 30. С. 25.
4. Schöll E. Nonlinear Spatio-temporal Dynamics and Chaos in Semiconductors. — Cambridge: Cambridge University Press. 2000.
5. Erlbach E.// Phys. Rev. 1963. V. 132. P. 1976.
6. Астров Ю. А. Кастальский А. А.// ФТП. 1972. № 6. С. 323.
7. Гершензон М. Е., Фалей М. И.// Письма в ЖЭТФ. 1986. № 44. С. 529.
8. Завьялов Д. Е., Крючков С. В.// ФТП. 2001. № 35. С. 575.
9. Dakhnovskii Yu., Metiu H.// Phys. Rev. B. 1995. V. 51. P. 4193.
10. Быков А. А., Исламов Д. Р., Номоконов Д. В., Бакаров А. К.// Письма в ЖЭТФ. 2007. № 86. С. 695.
11. Рыжский В. И.// ФТТ. 1969. № 11. С. 2577.
12. Романов Ю. А., Романов Ю. Ю.// Тез. VI Российской конф. по физике полупроводников, С.-Петербург, 27—31 октября 2003 г.
13. Бонч-Бруевич В. Л., Калашиников С. Г. Физика полупроводников. — М.: Наука, 1977.
14. Kamilov I. K., Aliev K. M., Ibragimov Kh. O., Abakarova N. S.// J. Phys.: Condens. Matter. 2001. V. 13. P. 4—519.
15. Усанов Д. А., Вениг С. Б., Орлов В. Е.// Письма в ЖЭТФ. 1999. № 25. С. 3—9.
16. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Угрюмова Н. В. и др.// ФТП. 2000. № 34. С. 5—67.
17. Unkelbach J., Amann A., Just W., Scholl E.// arXiv:cond-mat/0303385. 2003. V. 1.

## Response of a nonlinear system to external high-amplitude disturbances

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

Institute for Physics of Dagestan Research Center of the RAS, 94 Yaragsky str., Makhachkala, 367003, Russia  
E-mail: khmurat@iwt.ru

*Behavior of the dynamic and static voltage-current characteristic of tunnel diodes under the influence of external high-amplitude disturbances has been experimentally measured.*

PACS: 72.20. Ht; 72.20.+m

*Keywords:* nonlinear system, external disturbances, high amplitude.

Bibliography — 17 references.

Received April 25, 2010

\* \* \*