

Абсолютное отрицательное сопротивление и многозначности на вольт-амперных характеристиках туннельных диодов

© К.М. Алиев, И.К. Камиллов, Х.О. Ибрагимов[¶], Н.С. Абакарова^{¶¶}

Институт физики Дагестанского научного центра Российской академии наук,
367003 Махачкала, Россия

(Получена 6 мая 2008 г. Принята к печати 25 июня 2008 г.)

Экспериментально исследовано влияние внешних возмущений большой амплитуды в виде когерентного или шумового сигнала на поведение динамических и статических вольт-амперных характеристик туннельных диодов. Показано, что при подборе соответствующей частоты с ростом амплитуды внешнего когерентного сигнала на вольт-амперных характеристиках туннельных диодов появляются многозначности и абсолютное отрицательное сопротивление. Шумовое воздействие приводит к подавлению отрицательного дифференциального сопротивления N -типа на вольт-амперных характеристиках туннельных диодов и сильной деформации самих характеристик. Предложен возможный механизм появления абсолютного отрицательного сопротивления.

PACS: 72.20.Ht, 72.70.+m, 73.40.Gk, 85.30.Mn

В статье приводятся результаты экспериментального исследования влияния внешнего высокочастотного (ВЧ) когерентного сигнала с частотой до 100 МГц, амплитудой до 150 мВ и шумового воздействия спектрального состава до 6.5 МГц, с эффективной амплитудой напряжения до 300 мВ на поведение динамических и статических вольт-амперных характеристик (ВАХ) туннельных диодов серийного производства как в режиме переключения, так и в режиме генерации, а также их отклика на данные возмущения. Интерес к изучению отклика нелинейных систем на внешние возмущения вызван не только исследованием абсолютного отрицательного сопротивления (АОС), но и обнаружением стохастического резонанса в туннельных диодах [1,2], детерминированного стохастического резонанса в полупроводниковых бистабильных системах [3], а также интенсивными поисковыми работами в области пространственно-временной нелинейной динамики, хаотического состояния и его контроля, в том числе и в низкоразмерных структурах, таких как резонансные туннельные диоды [4] и др.

О наблюдении эффекта абсолютного отрицательного сопротивления, предсказанного в [5], связанного с сильной анизотропией проводимости в германии по кристаллографическим направлениям при разогреве носителей тока, когда не только дифференциальная, $\sigma_d = \partial j / \partial E$, но и статическая проводимость, $\sigma = j/E$ (где j — плотность тока, E — электрическое поле) становятся меньше нуля, по-видимому, впервые сообщалось в работе [6]. В работе [7] экспериментально обнаружено, что сопротивление туннельного контакта между сверхпроводниками при создании избыточных квазичастиц в электроде с большим значением энергетической щели становится отрицательным в определенном диапазоне напряжений смещений, т.е. туннельный контакт между сверхпроводниками с неравновесной функцией распределения квазичастиц проявляет АОС. Теоретический

анализ проводимости сверхрешетки при ее типичных параметрах в условиях воздействия нелинейной электромагнитной волны показал [8], что при напряженности поля волны $E \approx 1.8 \cdot 10^3$ В/см на вольт-амперной характеристике появляется участок АОС, как и в работе [9], посвященной исследованию проводимости двухбарьерных гетероструктур в сильном лазерном поле. Отметим еще работу [10], в которой экспериментально установлено, что при малых плотностях измерительного тока в неравновесном двумерном электронном газе в гетероструктурах в сильном магнитном поле электромагнитное излучение миллиметрового диапазона длин волн приводит к эффекту АОС, теоретически предсказанному в [11]. В этом случае АОС исчезает при возрастании величины измерительного тока. Наконец, в работе [12] абсолютное отрицательное сопротивление обнаружено в полупроводниковых 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 абсолютного отрицательного сопротивления в неравновесных электронных системах, на наш взгляд, остаются дискуссионными: состояния с АОС являются пространственно неоднородными и обусловлены, возможно, локальным отрицательным сопротивлением, что должно приводить к неустойчивостям, вызывающим образование сложных неравновесных структур в виде доменов поля, шнуров тока, страт или автосолитонов. Остаются не до конца определенными и экспериментальные условия, при которых возникает АОС в неравновесных системах.

Наши измерения проводились как в импульсном режиме генератора напряжения, так и на постоянном токе с источником питания с низкоомным выходом. Восходящие и нисходящие ветви ВАХ $I(V)$ в пропускном и обратном направлениях туннельных диодов записывались на экране осциллографа на треугольных импуль-

[¶] E-mail: khmurat@iwt.ru

^{¶¶} E-mail: abakarova_naida@mail.ru

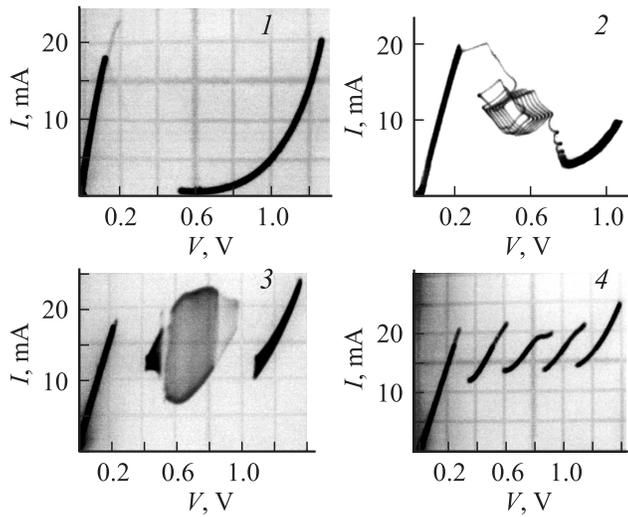


Рис. 1. Семейство ВАХ туннельного диода в импульсном режиме без внешнего сигнала (1) и при наложении внешнего когерентного сигнала с частотой 22 (2), 38 (3), 94 МГц (4).

сах с длительностью $\tau = 20\text{--}200$ мкс или на двухкоординатном самописце. Динамика переходных процессов изучалась на прямоугольных импульсах напряжения с длительностью $\tau = 10\text{--}100$ мкс. Для введения временных реализаций колебаний напряжения и тока в компьютер использовался двухканальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с частотой выборки до 1 ГГц, при измерениях на постоянном токе — АЦП с дифференциальными входами и частотой выборки 1 МГц. На основе полученных данных строились ВАХ, фазовые портреты и мощностные спектральные характеристики. Для наложения внешних возмущений использовались высокочастотный генератор Г4-158 и генератор шумов Г2-59. Нагрузочное сопротивление изменялось в пределах 5–100 Ом. Полоса пропускания осциллографа специально подбиралась не более 20 МГц, чтобы сохранить вид ВАХ диодов по постоянной составляющей тока.

ВАХ диодов без внешних возмущений, снятые в импульсном режиме и на постоянном токе, показали их полную идентичность и отсутствие каких-либо различий, связанных с джоулевым разогревом диодов.

На рис. 1 (кривая 1) приведена типичная ВАХ для туннельного диода в импульсном режиме, когда последовательно включенное в цепь диода нагрузочное токоснимающее сопротивление равно 50 Ом. Область осцилляций на прямоугольных импульсах в режиме генерации при нагрузочном сопротивлении 10 Ом для этого диода соответствует напряжениям 200–700 мВ. Наиболее характерные формы колебаний тока на падающем участке *N*-образной ВАХ с ростом величины приложенного к диоду напряжения смещения представляют собой структуры с заострениями (spiking), аналогичные обнаруженным в резонансных туннельных диодах и других бистабильных системах [4] (вставка на рис. 2).

Если к диоду с *N*-образной ВАХ (рис. 1, кривая 1) приложить переменное напряжение высокой частоты и соответствующей амплитуды, то вид ВАХ диода сильно изменится. Так, на рис. 1 (кривая 2) показана восходящая ветвь ВАХ для диода серийного производства при наложении сигнала частотой 22 МГц и амплитудой 30 мВ. Толщина линий ВАХ количественно соответствует амплитуде приложенного переменного напряжения в масштабах рисунка. Хорошо видно, что на падающем участке *N*-образной ВАХ диода возникает структура в виде двумерного тора, образующегося вследствие эффекта „захвата частоты“, приводящая к многозначностям ВАХ как по току, так и по напряжению. При записи восходящих и нисходящих ветвей ВАХ диода при различных длительностях треугольного импульса обнаружено, что структуры в виде двумерного тора на этих ветвях (рис. 1, кривая 2) совершенно совпадают по полям и токам при заданном значении тянущего поля в диоде. Кроме того, структуры более сложного характера возникают на ВАХ вследствие распада тора на два и более торов, близких по форме, при незначительном изменении частоты, амплитуды и величины тянущего поля.

Увеличение частоты высокочастотного сигнала до 38 МГц при сохранении амплитуды приложенного сигнала приводит к изменению формы структуры на ВАХ и возникновению второго падающего участка *N*-типа на вольт-амперной характеристике (рис. 1, кривая 3). Наложение высокочастотного сигнала на постоянную составляющую тока приводит в большинстве случаев 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 (кривая 4) представлен случай с четырьмя падающими участками, возникающими при частоте 94 МГц. Отметим, что при этой частоте с ростом амплитуды ВЧ сигнала на ВАХ сначала появляются 2 *N*-участка, потом 3 и далее 4 участка отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС).

Для исследования процессов переноса на постоянном токе при наложении высокочастотного сигнала были измерены статические восходящие и нисходящие ВАХ. Результаты таких измерений приведены на рис. 2 для частоты ВЧ сигнала 48 МГц с ростом его амплитуды от 0 до 150 мВ. Кривая 1 представляет собой типичную вольт-амперную характеристику для туннельного диода с выраженным гистерезисом на *N*-участке ВАХ. Увеличение амплитуды высокочастотного сигнала до 50 мВ приводит к резким изменениям ВАХ диода (рис. 2, кривая 2), которые в основном сводятся к следующему:

1) наблюдается значительное уменьшение туннельной и резкий рост диффузионной и избыточной компонент полного тока туннельного диода;

2) наблюдаются многозначности на ВАХ, т. е. имеется несколько падающих участков отрицательной дифференциальной проводимости с соответствующими им гистерезисами на восходящих и нисходящих ветвях.

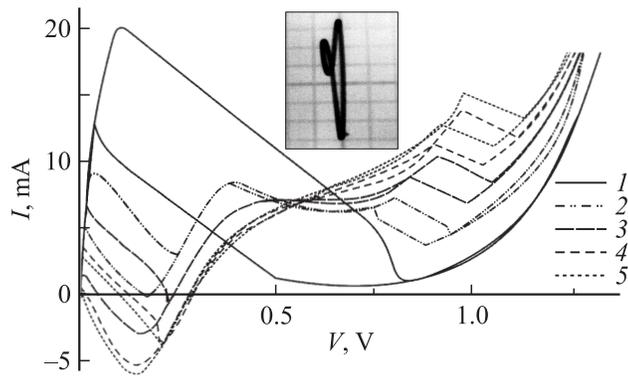


Рис. 2. Семейство восходящих и нисходящих ветвей ВАХ туннельного диода в прямом направлении по постоянному току при наложении внешнего когерентного сигнала с частотой 48 МГц. Амплитуда ВЧ сигнала, мВ: 1 — 0, 2 — 50, 3 — 75, 4 — 100, 5 — 150. На вставке — „режим с заострением“.

Дальнейшее увеличение амплитуды высокочастотного сигнала до 80 мВ (рис. 2, кривая 3) приводит к возникновению участка абсолютного отрицательного сопротивления на падающем участке ВАХ диода, величина которого увеличивается с ростом амплитуды приложенного сигнала (рис. 2, кривые 3, 4). При амплитуде ВЧ сигнала 150 мВ падающий участок полностью находится в области отрицательных токов вплоть до напряжения 290 мВ. Необходимо указать, что область АОС на ВАХ возникает не на всех частотах использованного в эксперименте диапазона высокочастотного сигнала. Остальные участки ВАХ при этом находятся выше оси напряжений, а диффузионные составляющие полного тока диода при этом растут с увеличением амплитуды ВЧ сигнала. Интересно отметить, что все кривые в области избыточных компонент тока проходят в окрестности одной точки, расположенной в области гистерезиса ВАХ диода в отсутствие высокочастотного сигнала.

Анализ простой полуэмпирической модели цепи, содержащей элемент с *N*-образной ВАХ и токоснимающее сопротивление (в нашем случае 50 Ом), когда к этой цепи одновременно приложены постоянное и переменное синусоидальное напряжения, показывает, что измеренные значения среднего тока за период колебаний не могут привести к эффекту АОС, хотя проводимость диода $\sigma = \langle j \rangle / (E_0 + E_m \cos \omega t)$ (где $\langle j \rangle$ — плотность общего тока, E_0 и E_m — постоянная составляющая и амплитуда переменной с частотой ω составляющей электрического поля соответственно) будет меняться как за счет изменения постоянного напряжения, так и за счет амплитуды выпрямленного переменного напряжения.

Детальный экспериментальный анализ переходных процессов показал, что абсолютное отрицательное сопротивление диода связано с возникновением динамических структур большой амплитуды (цикла, двумерного тора или более сложных странных аттракторов) на падающем участке *N*-образной вольт-амперной характеристики вследствие резонансного взаимодействия внеш-

него сигнала и собственных частот диода, приводящих обычно к режимам с заострениями. Одна из таких структур приведена на вставке рис. 2. Расчеты показывают, что только в этом случае суммарные токи могут привести к эффекту АОС. Возникновение устойчивой 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 такие сложные процессы, происходящие в туннельном диоде, как изменение положения уровня Ферми и смещение зон под действием переменного сигнала большой амплитуды, поведение хвостов плотности состояний, связанных с примесями, возможное частичное снятие вырождения или изменение распределения электрического поля в образце. АОС в полупроводниковых сверхрешетках в бигармонических полях [12], на наш взгляд, связано именно с механизмом, предложенным нами выше, так как оно возникло 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. При определенном сдвиге фаз между гармониками динамическая структура распадается или уменьшается „по амплитуде“ и происходит „гашение“ состояния с АОС [12].

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

Для сравнения нами исследовано влияние воздействия шумов со спектром частот до 6.5 МГц и эффективной амплитудой напряжения до 300 мВ на поведение статических ВАХ туннельных диодов. На рис. 3 приведена серия таких ВАХ при последовательном увеличении эффективной 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 как по току, так и по напряжению, а также к сильному росту избыточной компоненты полного тока и менее выраженному росту диффузионной компоненты. Дальнейшее увеличение амплитуды приводит к полному

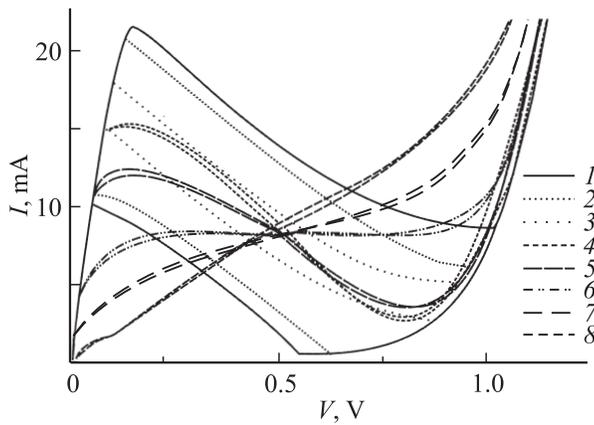


Рис. 3. Семейство восходящих и нисходящих ВАХ туннельного диода в прямом направлении по постоянному току при наложении шумового сигнала со спектром частот до 6.5 МГц. Эффективная амплитуда шумового сигнала, мВ: 1 — 0, 2 — 15, 3 — 30, 4 — 80, 5 — 125, 6 — 150, 7 — 200, 8 — 300.

исчезновению гистерезиса на N -участке ВАХ, а начиная с 140 мВ — к исчезновению самого N -участка с ОДС. При этом наблюдаются резкое уменьшение туннельной составляющей полной компоненты тока и рост диффузионной и избыточной его составляющих. ВАХ диода приобретает вид, близкий к линейному. 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 туннельном диоде не наблюдается вплоть до 500 мВ.

Без детального обсуждения отметим, что обратные ветви ВАХ туннельного диода также весьма подвержены влиянию внешних возмущений. При малых амплитудах возмущений в случае когерентного воздействия на ВАХ обычно наблюдается незначительное уменьшение проводимости. С ростом амплитуды возмущений в случае когерентного воздействия 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 постоянному току цепи, под воздействием когерентного или шумового возмущения возникает значительная статическая эдс, что при измерении на постоянном токе обычно приводит к „убеганию“ нулевой точки на координатной плоскости $I = f(V)$.

Замечена еще одна особенность ВАХ туннельного диода при воздействии на него когерентного возмущения в частотном диапазоне 83–99 МГц: на восходящей ветви ВАХ при соответствующей амплитуде проявляется участок Z -типа, который не воспроизводится на нисходящей ветви ВАХ.

Для объяснения механизма такого типа ВАХ, обнаруженного в работе [17], в некотором интервале приложенных напряжений была привлечена модель „реакция–диффузия“, где динамическим активатором является плотность носителей тока, а ингибитором — падение напряжения на приборе.

Была сделана попытка использования полученных форм ВАХ и структур, наблюдаемых на этих вольт-амперных характеристиках, 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 на отдельных падающих участках вольт-амперных характеристик, захвата частоты, хаотизации и упорядочения, что может быть использовано при создании элементов многозначной логики, преобразователей частоты и генераторов самых различных сигналов включая гармонические, релаксационные и хаотические.

В заключение отметим, что 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:

- эффект абсолютного отрицательного сопротивления;
- многозначности ВАХ, т.е. несколько участков N -, S -типа на ВАХ;
- сильная деформация ВАХ, связанная с неоднозначными изменениями туннельной, избыточной и диффузионной компонент полного тока диода;
- при больших когерентных возмущениях резкий рост сопротивления и N -образный участок на обратных ветвях ВАХ; при больших шумовых возмущениях резкий рост сопротивления, а при дальнейшем увеличении амплитуды ступенчатый рост тока, плавный переход ВАХ к S -образному виду;
- Z -образный участок на прямых восходящих ветвях ВАХ, который отсутствует на обратных ветвях;
- проявление значительных эдс в разомкнутой по постоянному току цепи с туннельным диодом при наложении на нее когерентных или шумовых возмущений большой амплитуды.

Туннельный диод, толщина барьера p - n -перехода в котором с ростом концентрации носителей тока при определенных ее значениях становится сравнимой с длиной волны де-Бройля (10^{-6} см при комнатной температуре), при соответствующих внешних воздействиях ведет себя как двумерная структура с характерными для нее свойствами: внутренней бистабильностью, многозначностями на ВАХ, возникновением режимов с заострениями и сильной зависимостью от параметров внешней цепи.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 06-02-96613 — Юг России, НШ 4526.2008.2 и РФФИ № 09-02-00074-а.

Список литературы

- [1] R.N. Mantegna, B. Spagnola. Phys. Rev. E, **49**, R1792 (1994).
- [2] В.С. Анищенко, А.Б. Нейман, Ф. Мосс, Л. Шиманский-Гайер. УФН, **169**, 7 (1999).
- [3] И.К. Камиллов, К.М. Алиев, Х.О. Ибрагимов, Н.С. Абакарова. Письма ЖТФ, **30**, 25 (2004).
- [4] E. Schöll. *Nonlinear Spatio-Temporal Dynamics and Chaos in Semiconductors* (Cambridge, Cambridge University Press, 2000).
- [5] E. Erlbach. Phys. Rev., **132**, 1976 (1963).
- [6] Ю.А. Астров, А.А. Кастальский. ФТП, **6**, 323 (1972).
- [7] М.Е. Гершензон, М.И. Фалей. Письма ЖЭТФ, **44** (11), 529 (1986).
- [8] Д.Е. Завьялов, С.В. Крючков. ФТП, **35** (5), 575 (2001).
- [9] Yu. Dakhnovskii, H. Metiu. Phys. Rev. B, **51** (7), 4193 (1995).
- [10] А.А. Быков, Д.Р. Исламов, Д.В. Номоконов, А.К. Бакаров. Письма ЖЭТФ, **86** (9), 695 (2007).
- [11] В.И. Рыжий. ФТТ, **11**, 2577 (1969).
- [12] Ю.А. Романов, Ю.Ю. Романов. Тез. VI Росс. конф. по физике полупроводников (С.-Петербург, 2003).
- [13] В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. *Физика полупроводников* (М., Наука, 1977).
- [14] I.K. Kamilov, K.M. Aliev, Kh.O. Ibragimov, N.S. Abakarova. J. Phys.: Condens. Matter, **13**, 4519 (2001).
- [15] Д.А. Усанов, С.Б. Вениг, В.Е. Орлов. Письма ЖЭТФ, **25** (2), 39 (1999).
- [16] Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Н.В. Угрюмова, С.Б. Вениг, В.Е. Орлов. ФТП, **34** (5), 567 (2000).
- [17] J. Unkelbach, A. Amann, W. Just, E. Scholl. arXiv:cond-mat/0303385.2003.1

Редактор Л.В. Шаронова

Absolute negative resistance and multivaluednesses on current–voltage characteristics of tunnel diodes

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

Kh.I. Amirkhanov Institute of Physics,
Dagestan Scientific Center
of Russian Academy of Sciences,
367003 Makhachkala, Russia

Abstract Influence of the external coherent and noise excitations with large amplitude on behavior of dynamic and static current–voltage characteristics of tunnel diodes have been investigated experimentally. It was shown, at choice of the external coherent signal with fitting frequency, on the current–voltage characteristics of tunnel diode the multivaluednesses and absolute negative resistance occurred. The noise perturbation suppressed the *N*-type negative differential resistance on the current–voltage characteristics of tunnel diode and led to strong deformation of the characteristics. The possible mechanism of the absolute negative resistance is supposed.