



## НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СВЧ-УСТРОЙСТВ\*

*Д.А. Усанов*

Обобщены результаты исследований нелинейной динамики различных типов полупроводниковых приборов в схемах СВЧ. Отмечается возможность качественного изменения вида вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов при воздействии на них СВЧ-излучения. Подчеркивается сложность теоретического описания наблюдающихся экспериментально последовательностей изменения режимов работы полупроводниковых СВЧ-устройств при увеличении уровня воздействующей на них мощности СВЧ-сигнала.

К настоящему времени с помощью твердотельных приборов можно реализовать большинство радиотехнических функций в диапазоне СВЧ. Стали ясны и основные недостатки твердотельных СВЧ-устройств, ограничивающие области их применения. К числу таких недостатков можно отнести, в частности, зависимость характеристик полупроводниковых приборов, составляющих основную элементную базу устройств твердотельной СВЧ-электроники, от уровня мощности воздействующего на них сигнала. В результате такого воздействия полупроводниковые приборы могут существенным образом изменять режим своей работы вплоть до полного выхода их из строя. В этой связи теоретические и экспериментальные исследования характера нелинейной динамики полупроводниковых приборов СВЧ представляются актуальными.

При описании свойств полупроводниковых приборов на СВЧ часто считают возможным использовать их стационарные или малосигнальные характеристики – вольт-амперную характеристику (ВАХ), импеданс. Такой подход позволяет успешно конструировать различного типа СВЧ-устройства на полупроводниковых приборах. В то же время ясно, что с увеличением уровня воздействующей СВЧ-мощности возможно существенное изменение свойств полупроводниковых приборов. Для устранения влияния внешних СВЧ-сигналов используют так называемые защитные устройства или СВЧ-ограничители [1,2] и, в частности, ограничители на  $p-i-n$ -диодах. То есть  $p-i-n$ -диоды в таких приборах по своему назначению находятся в условиях воздействия изменяющегося в широких пределах уровня СВЧ-мощности.

Было установлено, что при определенных уровнях СВЧ-мощности в  $p-i-n$  диодах может происходить скачкообразное изменение выпрямленного тока [3,4]. Возникновение таких скачков тока объяснено [5] нелинейным характером

\* Статья написана по материалам лекции, прочитанной на IX Международной школе по электронике СВЧ и радиофизике, Саратов, 2–6 марта 1999 года.

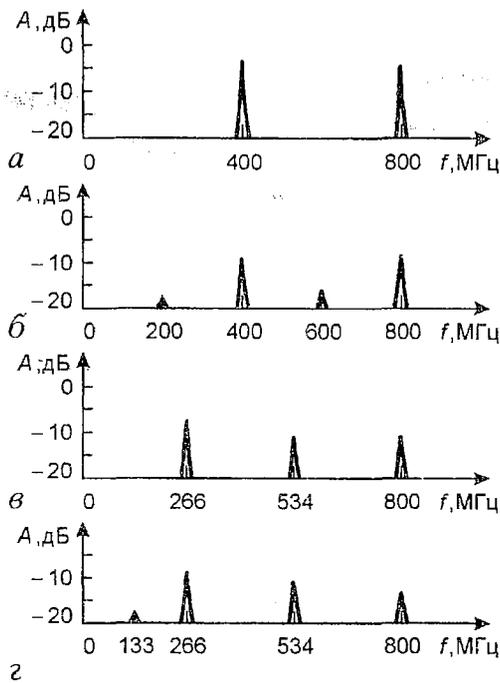


Рис. 1. Спектрограммы выходного сигнала ограничителя при входной мощности, Вт: а - 0.3, б - 0.7, в - 1.1, г - 1.8

с отрицательным дифференциальным сопротивлением (рис. 2) и, как следствие этого, к модуляции выходного СВЧ-сигнала сравнительно более низкочастотными колебаниями, частота и форма которых зависят от частоты и амплитуды входного сигнала [9]. Теоретическое объяснение этого эффекта стало возможным при учете в физической модели эффектов разогрева носителей заряда, детекторного эффекта и зависимостью импеданса диода от уровня входной СВЧ-мощности [10].

Явление возникновения гармонических составляющих при воздействии на полупроводниковый элемент СВЧ-сигнала было хорошо изучено. Для предотвращения влияния высших гармоник на характеристики СВЧ-ограничителей на р-і-п-диодах в их схемах предусматривалось введение фильтров низких частот. В то же время возникающие субгармонические составляющие в широкополосных волноведущих системах могут распространяться и тем самым влиять на выходные параметры устройства, в частности, увеличивать уровень просачивающейся через ограничитель мощности.

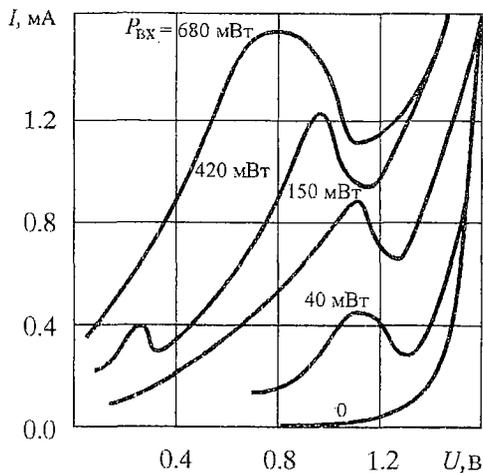


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики диодов типа 2A534A при различных уровнях входной мощности

барьерной емкости р-і-перехода, образующей с индуктивностью выводов диодов нелинейный колебательный контур, имеющий два различных устойчивых состояния. Интересно отметить, что в спектре выходного сигнала ограничителя с увеличением уровня мощности входного сигнала  $P_{вх}$  с частотой  $f_0$  (рис.1) наблюдается последовательное появление составляющих с  $f_0/2$ ,  $f_0/4$ , области шумового спектра, составляющих  $f_0/3$ ,  $f_0/6$  [6]. Теоретическое возникновение субгармонических составляющих и гистерезис в СВЧ-ограничителях описаны с использованием представления р-і-п-диода в виде нелинейного колебательного контура [7].

Следует отметить, что характера наблюдавшейся в эксперименте последовательности появления субгармонических составляющих описать не удалось.

Воздействие высокого уровня мощности на р-і-п-диод [4] или на два последовательно соединенных р-і-п-диода [8] может приводить к появлению на ВАХ одного или нескольких участков

на ВАХ одного или нескольких участков

же время возникающие субгармонические составляющие в широкополосных волноведущих системах могут распространяться и тем самым влиять на выходные параметры устройства, в частности, увеличивать уровень просачивающейся через ограничитель мощности. Проведенные экспериментальные исследования показали, что введение в схему ограничителя фильтра высоких частот, отсекающего субгармонические составляющие, позволяет существенно сократить уровень просачивающейся мощности СВЧ-излучения [9]. В работе [11] показано, что в результате действия СВЧ-излучения на ВАХ диодов с р-п-переходом могут возникать и S-образные участки.

Одним из наиболее изученных полупроводниковых СВЧ-приборов

является *туннельный диод*. В том числе известны теоретические исследования нелинейной динамики устройств на туннельных диодах. Одно из предположений, которое принимается при моделировании работы устройств на туннельных диодах, состоит в том, что его вольт-амперная характеристика содержит участок отрицательного дифференциального сопротивления  $N$ -типа, и при увеличении уровня воздействующей на диод мощности СВЧ-излучения она остается неизменной.

В результате проведенных экспериментальных исследований было установлено, что, в противоположность описанной выше ситуации, характерной для  $p-i-n$ -диодов, когда воздействие СВЧ-излучения приводило к наведению на ВАХ участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением, такое воздействие на туннельный диод может приводить к изменению его ВАХ от  $N$ -образной до приближающейся к экспоненциальной, характерной для ВАХ обычного невырожденного  $p-n$ -перехода (рис. 3) [12,13].

В случае использования туннельного диода в качестве активного элемента СВЧ-генератора следствием увеличения мощности подводимого внешнего сигнала является уменьшение генерируемой мощности и последующий срыв СВЧ-колебаний. При этом восстановление режима генерации колебаний наблюдается при существенно меньших значениях мощности внешнего СВЧ-сигнала, то есть зависимость относительной мощности, генерируемой туннельным диодом, от величины мощности внешнего СВЧ-сигнала носит гистерезисный характер.

Как известно,  $N$ -образный вид ВАХ туннельного диода связан с тем, что  $p-n$ -переход в нем образуется в результате контакта двух вырожденных полупроводников. Следовательно, исчезновение на ВАХ участка с отрицательным сопротивлением, которое наблюдается при воздействии СВЧ-излучения, может означать снятие вырождения в  $p$ - и  $n$ -областях  $p-n$ -перехода. Теоретическое обоснование этого утверждения приведено в работе [14]. Из теории следует, что описанный характер изменения ВАХ связан с разогревом носителей заряда полем СВЧ и появлением продетектированного сигнала.

В работе [15] описан экспериментально обнаруженный эффект возникновения участка отрицательного дифференциального сопротивления на ВАХ туннельного диода под воздействием внешнего СВЧ-сигнала для случая, когда напряжение смещения на диоде в отсутствие СВЧ-сигнала существенно меньше пикового значения. ВАХ туннельного диода типа 1Н308 при различных значениях тока через диод в отсутствие СВЧ-сигнала (кривые 1) и при подаче внешнего СВЧ-сигнала (кривые 2) различной мощности приведены на рис. 4.

Воздействие СВЧ-излучения качественным образом изменяет спектр выходного сигнала *устройств на диодах Ганна*, импеданс которых имеет ярко выраженный нелинейный характер. При этом вид нелинейности диода существенным образом зависит от его режима питания, элементов конструктивного исполнения, типа электродинамической системы, в которую он помещен, и других факторов [16-20]. При воздействии на диод Ганна, работающий в режиме усиления внешнего СВЧ-сигнала, начиная с некоторого уровня мощности на выходе возникают субгармонические составляющие  $f_0/2$ ,  $f_0/4$ ,  $f_0/8$  и шумовая генерация. При этом наблюдается скачкообразное изменение продетектированного диодом Ганна напряжения. При воздействии на диод Ганна, работающий в режиме многочастотной генерации, внешним сигналом на частоте его субгармоники, каждая мода в спектре выходного сигнала занимала положение, соответствующее по частоте ближайшей к ней гармонике синхронизированного

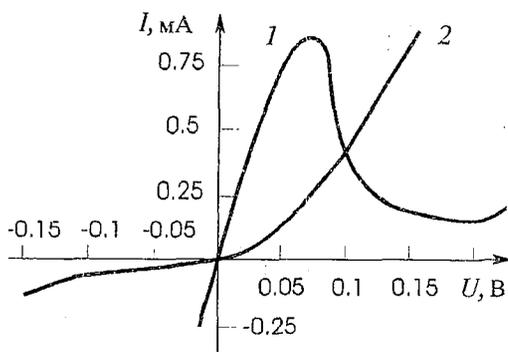


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики туннельного диода: 1 - в отсутствие внешнего СВЧ-сигнала, 2 - при подаче СВЧ-сигнала мощностью 2 мВт

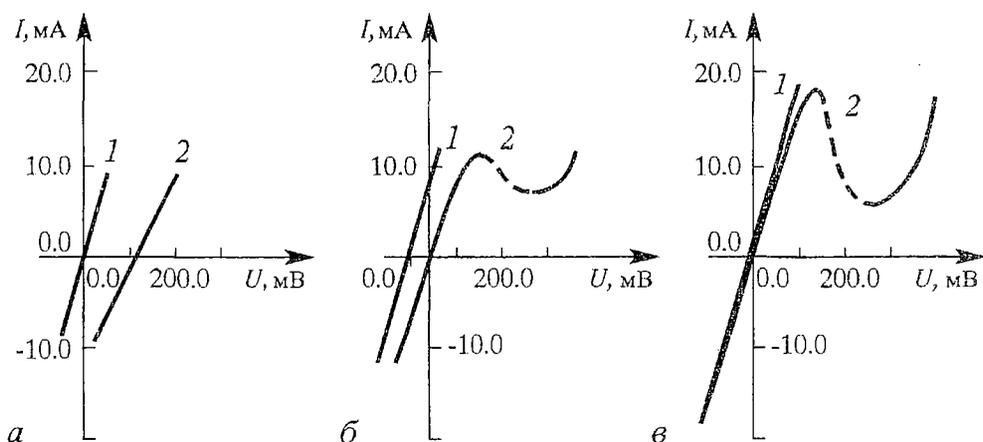


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики туннельного диода при различных значениях тока через диод в отсутствие СВЧ-сигнала (кривые 1) и при подаче внешнего СВЧ-сигнала (кривые 2) различной мощности, мВт: а – 1600, б – 300, в – 2

сигнала [21]. При повышении мощности синхронизирующего сигнала зависимость мощности генератора от частоты расстройки принимала гистерезисный характер [22]. Если частота внешнего сигнала близка к собственной частоте генерации, то возникает модуляция. При этом глубина модуляции, частота и форма модулирующего сигнала зависят от величины расстройки и мощности внешнего сигнала [23]. Максимальные значения частот модуляции достигаются при мощностях внешнего СВЧ-сигнала, сравнимых с мощностью собственной генерации СВЧ-генератора на диоде Ганна. Если кроме основного сигнала на диод Ганна воздействует внешний сигнал, то наблюдается его влияние на уровень пороговой мощности основного сигнала, при котором происходит возникновение субгармонических составляющих [24]. Особенно сильно это влияние в случае, когда частота дополнительного сигнала близка к  $f_0/4$ . Наряду с уменьшением пороговой мощности воздействие дополнительного сигнала приводит к увеличению амплитуд субгармонических составляющих. Отметим, что введение фильтра, отсекающего субгармонические составляющие, позволяет в два раза увеличить максимальное значение мощности, при котором коэффициент усиления  $K_y$  не зависит от уровня мощности входного сигнала  $P_0$  (рис. 5) [25]. В реальных конструкциях генераторов на диодах Ганна происходит саморазогрев кристалла диода, следствием которого в зависимости от напряжения питания может быть хаотизация либо, напротив, регуляризация колебаний [26].

Генерация субгармонических составляющих наблюдалась и при воздействии внешнего СВЧ-сигнала на *арсенид-галлиевый полевой транзистор с барьером Шоттки*, работающий в режиме усиления [27]. Особенностью поведения такого типа транзистора при воздействии на него внешнего СВЧ-сигнала является появление субгармоник  $f_0/2$  и  $f_0/9$  при определенном режиме питания и в ограниченном интервале уровней СВЧ-мощности.

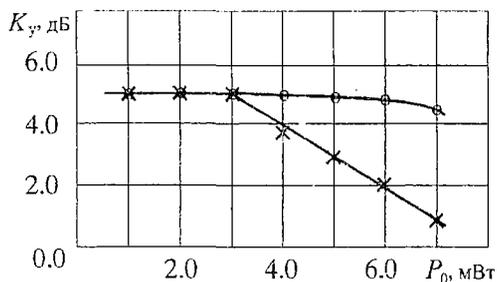


Рис. 5. Зависимость коэффициента усиления  $K_y$  от уровня мощности входного сигнала СВЧ-генератора на диоде Ганна с фильтром (о) и без фильтра (х)

Следует отметить, что при теоретическом описании нелинейной динамики полупроводниковых элементов приходится использовать эквивалентные схемы, включающие довольно большое число элементов. Такие схемы описываются системами дифференциальных уравнений, составленных с использованием законов Кирхгофа. Типичной является ситуация, когда число таких уравнений достигает четырнадцати.

Кроме описанных выше эффектов при изменении уровня мощности СВЧ-излучения, воздействующего на полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением, наблюдается и эффект детектирования. Специфика проявления этого эффекта и различные аспекты его практического использования изучены для усилителей и генераторов на диодах Ганна, ЛПД, туннельных диодах, биполярных и полевых транзисторах [28].

Из результатов экспериментальных исследований характера изменения ВАХ точечных детекторных диодов при воздействии на них внешнего СВЧ-сигнала следует, что с ростом уровня воздействующей мощности ВАХ постепенно выпрямляется и при высоких уровнях мощности представляет собой прямую линию [29]. При этом диод продолжает детектировать СВЧ-сигнал. Последнее позволяет предположить, что преобладающим или, по крайней мере, весьма существенным механизмом детектирования при этом является термоэдс горячих носителей тока.

Таким образом, воздействие СВЧ-излучения на полупроводниковые приборы может приводить к существенному изменению их характеристик: появлению или исчезновению на ВАХ участков отрицательного сопротивления  $N$ - или  $S$ -типа, генерации субгармонических составляющих и шума, модуляции, гистерезисного характера зависимостей их характеристик. Поведение различных типов полупроводниковых приборов под действием СВЧ-излучения имеет свою специфику. Учет описанных эффектов существенен при анализе физики работы различного типа полупроводниковых приборов СВЧ, при определении условий их эксплуатации и областей применения. Использование этих эффектов позволяет создавать различного типа измерительные устройства, предотвращение их появления позволяет улучшить основные характеристики некоторых типов устройств.

## Библиографический список

1. Лебедев И.В., Шитников А.С., Купцов Е.И. Твердотельные СВЧ ограничители – проблемы и решения // Изв. вузов. РЭ. 1977. Т. 20, № 2. С. 5.
2. Виненко В.Г., Красовский С.В., Усанов Д.А. СВЧ ограничители мощности на полупроводниковых диодах // Обзоры по электронной технике. Сер.1. Электроника СВЧ. 1988. Вып. 3. 45 с.
3. Дзехцер Г.Б., Либерман Л.С., Шпирт В.А. О некоторых эффектах, возникающих в  $p^+-n-n^+$  ( $p^+-p-n^+$ ) структурах под действием СВЧ-поля // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 1972. № 2. С. 68.
4. Дзехцер Г.Б., Николаев Ю.И., Орлов О.С. К вопросу о взаимодействии плоскостного полупроводникового диода с электронным СВЧ-полем // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 6. Радиоизмерительная техника. 1971. Вып. 3. С. 3.
5. Красовский С.В., Усанов Д.А. Скачкообразные изменения характеристик СВЧ-ограничителей на  $p-i-n$ -диодах // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1985. Вып. 12. С. 7.
6. Виненко В.Г., Красовский С.В., Усанов Д.А. Спектральный состав выходного сигнала СВЧ-ограничителей мощности на  $p-i-n$ -диодах // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1987. Вып. 8. С. 7.
7. Красовский С.В., Родина Л.П., Усанов Д.А. Явление удвоения периода в квазиактивном ограничителе на  $p-i-n$ -диодах // Изв. вузов. РЭ. 1993. Т. 36, № 2. С. 77.
8. А.с. 1297139 СССР, МКИ H01 P 1/22. СВЧ-ограничитель / Виненко В.Г., Красовский С.В., Усанов Д.А. // Бюл. № 10. 2 с. 15.03.87 (Заявлено 28.10.85).
9. Виненко В.Г., Красовский С.В., Усанов Д.А. Модуляция выходного сигнала в СВЧ-ограничителях мощности на  $p-i-n$ -диодах // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ 1987. Вып. 4. С. 38.
10. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Угрюмова Н.В. Возникновение

отрицательного дифференциального сопротивления в р-і-п-диодных структурах при воздействии СВЧ-излучения // Изв. вузов. Электроника. 1997. № 3-4. С. 48.

11. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Угрюмова Н.В. Возникновение S-образных участков на вольт-амперных характеристиках с р-п-переходом под действием СВЧ-излучения. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. №1. С. 42.

12. Усанов Д.А., Коротин Б.Н., Орлов В.Е., Скрипаль А.В. Снятие вырождения в р- и п-областях р-п-перехода внешним СВЧ-сигналом // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16, вып. 8. С. 50.

13. Усанов Д.А., Орлов В.Е., Коротин Б.Н., Скрипаль А.В. Влияние внешнего СВЧ сигнала на работу СВЧ генератора на туннельном диоде // Изв. вузов. Радиофизика. 1991. Т. 34, N 1. С. 81.

14. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Коротин Б.Н., Орлов В.Е. Влияние греющего СВЧ поля на вид вольт-амперной характеристики туннельного диода // Письма в ЖТФ. 1993. Т.19, вып. 7. С.81.

15. Усанов Д.А., Горбатов С.С., Семенов А.А. Изменение вида вольт-амперной характеристики диода Ганна в зависимости от режима его работы на СВЧ // Изв. вузов. РЭ. 1991. Т. 34, № 5. С. 107.

16. Перлмен Б., Упадхияюла Ч., Секанович В. Сверхвысокочастотные свойства и применения приборов с переносом электронов и отрицательной проводимостью // ТИИЭР. 1971. Т.59, № 8. С.115.

17. Усанов Д.А., Вениг С.Б., Орлов В.Е. Отрицательное сопротивление туннельного диода, наведенное внешним СВЧ-сигналом // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. № 2. С. 39.

18. Мидзусима С. Представление ганновских диодов в виде параллельно соединенных нелинейной активной проводимости и нелинейной емкости // ТИИЭР. 1972. Т. 61, № 1. С. 159.

19. Усанов Д.А., Вениг С.Б., Горбатов С.С., Семенов А.А. Смена знака нелинейной составляющей реактивности и гистерезис у диодов Ганна в режиме генерации // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20, вып. 21. С. 21.

20. Усанов Д.А., Горбатов С.С. Генерация субгармоник СВЧ диодом Ганна // Тезисы докладов VII Всесоюзного симпозиума «Плазма и неустойчивости в полупроводниках». Паланга, 1989. 4.1. С. 77.

21. Усанов Д.А., Горбатов С.С., Вениг С.Б., Семенов А.А. Синхронизация мод в СВЧ генераторах на диодах Ганна // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18, вып. 12. С. 26.

22. Усанов Д.А., Вениг С.Б., Горбатов С.С., Семенов А.А. Влияние нелинейного характера импеданса диодов Ганна на работу СВЧ генераторов на их основе // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1994. Т. 2, № 5. С. 35.

23. Усанов Д.А., Вениг С.Б., Горбатов С.С., Семенов А.А. Модуляция выходного сигнала генератора на диоде Ганна воздействием на него внешнего СВЧ сигнала // Изв. вузов. Радиофизика. 1995. Т. 38, № 9. С. 982.

24. Усанов Д.А., Горбатов С.С., Семенов А.А. Двухчастотный режим работы СВЧ усилителя на диоде Ганна // Изв. вузов. Радиофизика. 1990. Т. 33, № 12. С. 1429.

25. Семенов А.А. Исследование нелинейных режимов работы полупроводниковых приборов СВЧ. Дис... канд. физ.-мат. наук. Саратов: Изд-во СГУ, 1994. 126 с.

26. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Бабаян А.В. Влияние саморазогрева диодов Ганна на спектр выходного сигнала генераторов на их основе // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1998. Т.6, № 6. С. 20.

27. Skripal A.V., Usanov D.A., Tyajlov V.S., Vasilieva A.V. Subharmonic generation in GaAs FET amplifier // Proc. XI International Microwave conf. Mikon 96. Poland. Warsaw. May 27-30. 1996. Vol. 2. P. 450.

28. Усанов Д.А. Исследование эффектов детектирования в полупроводниковых СВЧ диодах и транзисторах, работающих в режиме усиления или генерации // Труды II Всесоюзной школы-семинара «Взаимодействие электромагнитных волн с полупроводниками и полупроводниково-диэлектрическими структурами». 4-10 сентября 1988 г. Часть 1. Саратов: Издательство СГУ, 1988. С. 1640.

29. Усанов Д.А., Вениг С.Б., Орлов В.Е. Механизмы детектирования точеч-

ными диодами при воздействии высоких уровней СВЧ мощности // Материалы междуна. научно-тех. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-98», 7-9 сентября 1998 г. Саратов: СГТУ, 1998. С.16.

*Саратовский государственный  
университет*

*Поступила в редакцию 24.06.99*

## NONLINEAR DYNAMICS OF SOLID-STATE MICROWAVE DEVICES

*D.A. Usanov*

Investigation results of nonlinear dynamics of various kind of semiconductor devices in the microwave circuits are summarized. The possibility of qualitative variation of VA-characteristic form of semiconductor devices on exposure to microwave radiation is noted. The difficulties of theoretical description of experimentally observed sequence of operation regime variation of semiconductor microwave devices with power increase of influenced microwave signal are emphasized.



*Усанов Дмитрий Александрович* родился в 1943 году в Менделеевске (Татария). Окончил Саратовский госуниверситет (1965). Кандидат физико-математических наук (1972), доктор физико-математических наук (1989), с 1990 – профессор кафедры физики твердого тела, с 1985 по настоящее время – заведующий кафедрой физики твердого тела, с 1989 – проректор по НИР СГУ. Автор большого числа статей и изобретений по твердотельной электронике и радиофизике. Заслуженный деятель науки РФ, академик МАН ВШ, член IEEE. E-mail: usanovda@info.sgu.ru