

Отрицательное дифференциальное сопротивление N-типа, гистерезис и осцилляции на вольт-амперных характеристиках сверхвысокочастотных диодов

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

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

(Получена 13 декабря 2011 г. Принята к печати 30 декабря 2011 г.)

Экспериментально исследованы вольт-амперные характеристики сверхвысокочастотных диодов на постоянном токе при одновременном воздействии на них гармонического высокочастотного сигнала до 100 МГц большой амплитуды. На вольт-амперных характеристиках сверхвысокочастотных диодов обнаружены участки с отрицательным дифференциальным сопротивлением N-типа, гистерезис и осцилляции тока в зависимости от амплитуды и частоты высокочастотного сигнала. Проведен сравнительный анализ и обсуждены возможные механизмы обнаруженных явлений.

1. Введение

Ранее было показано [1–6], что одновременное воздействие гармонического сигнала и постоянного смещения того же порядка по величине на полупроводниковые структуры с нелинейными свойствами приводит к качественному изменению их стационарных вольт-амперных характеристик (ВАХ) и к целому ряду неординарных явлений. Наблюдаются многозначности (несколько N-участков), S- и Z-образные участки на ВАХ, эффект абсолютного отрицательного сопротивления, ступенчатые осцилляции тока. При шумовом воздействии в туннельных диодах имеет место подавление N-образности и т.д. Обнаруженные неординарные явления стимулируют дальнейшие исследования в этом направлении.

Теоретический анализ подобной ситуации в приближении малосигнальной модели для диода, когда $U_{ac} = kT/e$ ($U = 26$ мВ при 300 К) имеет синусоидальный вид, а нелинейность и неравновесность системы обусловлены лишь напряжением смещения, проведен в работах [7,8] и не выявил отмеченные выше нетривиальные явления. Импульсные и частотные характеристики диодных структур в данной модели в зависимости от степени легирования, толщины базы, частоты приложенного сигнала, уровня инжекции и эффективности концентрации центров рекомбинации подробно изучены [7,8].

В данной работе продолжено изучение отклика полупроводниковых структур на внешние возмущения в случае одновременного воздействия на них гармонического сигнала $U_{ac} = U_0 e^{i\omega t}$ и постоянного напряжения смещения того же порядка по величине. Приведены результаты экспериментального исследования влияния высокочастотного (ВЧ) сигнала большой амплитуды и частотой до 100 МГц на ВАХ сверхвысокочастотных (СВЧ) диодов серийного производства и общего применения, измеренные на постоянном токе.

2. Методика измерений

Схема измерения включала в себя генератор сигналов специальной формы Г6-15, высокочастотный генератор Г4-158 и токоограничивающее сопротивление 5–100 Ом, последовательно с которым включался в цепь исследуемый диод [2–4]. ВАХ диода в режиме медленно меняющегося напряжения смещения регистрировалась двухкоординатным самопишущим потенциометром, а в импульсном режиме — осциллографом. Напряжение смещения U подавалось на образец либо в форме треугольных импульсов с амплитудой от $-U$ до $+U$, либо в форме пилообразных импульсов. Для сведения к минимуму индуктивности цепи особое внимание уделялось конструкции держателя СВЧ диода. Держатель состоял из двух медных плат с отверстиями, куда ввинчивался диод, или из двух контактных цилиндров с продольными разрезами и диаметром, соответствующими размерам контактов диода. Сравнительный анализ ВАХ исследованных структур, полученных как в импульсном режиме, так и на постоянном токе, показал их полную идентичность в пределах использованных на опыте приложенных напряжений и отсутствие каких-либо различий, связанных с джоулевым разогревом.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены семейства прямых и обратных ветвей ВАХ СВЧ диода 1A501B (германиевый диффузионный, предназначенный для применения в переключающих устройствах в диапазоне волн 3 см), измеренные при 300 К на треугольных импульсах напряжения с длительностью $\tau = 10$ с. На рис. 1, а представлены вольт-амперные характеристики диода при изменении частоты и при заданной амплитуде внешнего сигнала на выходе ВЧ генератора. На рис. 1, б — ВАХ при заданной частоте с ростом амплитуды ВЧ сигнала. Частота переменного сигнала изменялась в пределах

[¶] E-mail: khmurat@mail.ru

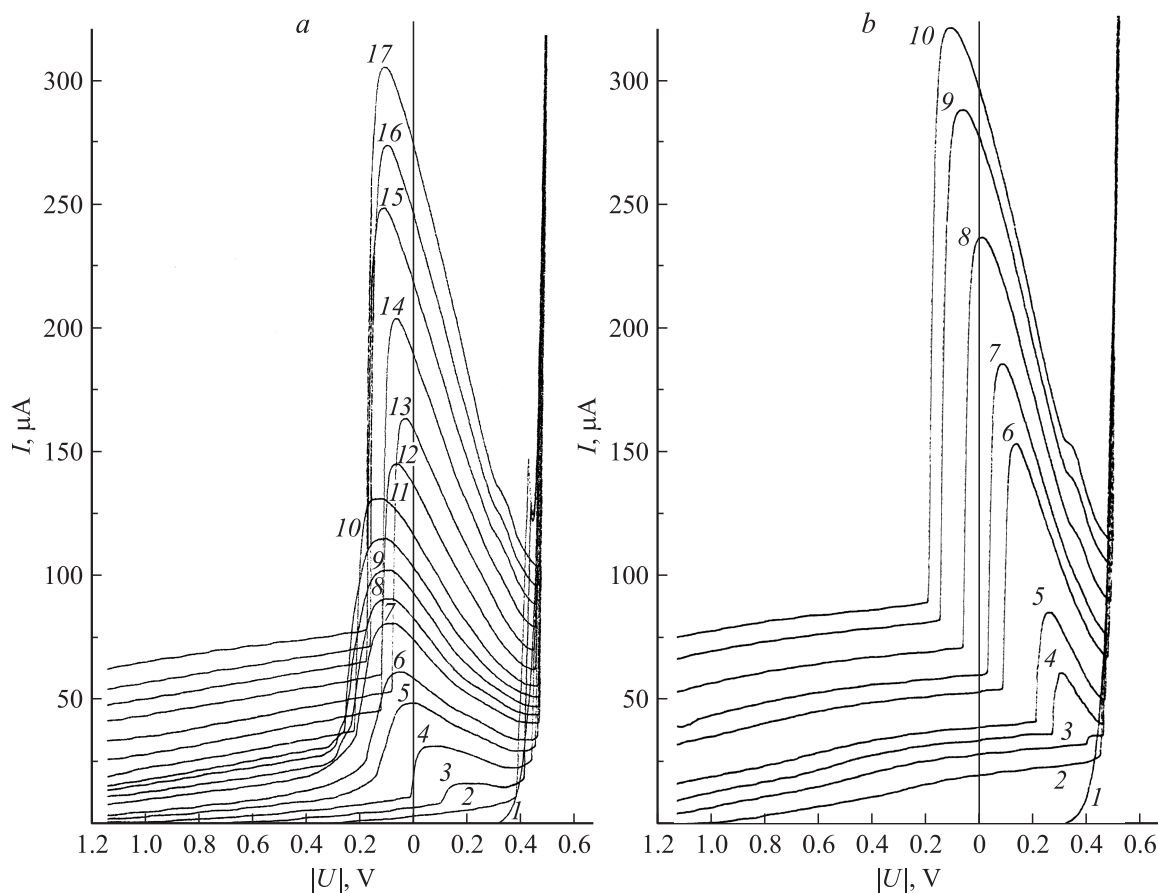


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики сверхвысокочастотного диода 1A501B: *a* — при уменьшении частоты высокочастотного сигнала в интервале 71–56 МГц (кривые 2–17) и заданной амплитуде $U = 2.8$ В (кривая 1 — 0, кривые 2–17 — через 1 МГц); *b* — при заданной частоте 56 МГц с ростом амплитуды высокочастотного сигнала U , В: 1 — 0, 2 — 1.2, 3 — 1.3, 4 — 1.5; 5 — 1.7, 6 — 2.0, 7 — 2.35, 8 — 2.6, 9 — 2.75, 10 — 3.0.

10–100 МГц. ВАХ, измеренные без внешнего сигнала, полностью соответствовали паспортным данным диода.

При соответствующем подборе частоты и амплитуды внешнего ВЧ сигнала на ВАХ диода возникает участок отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС) N-типа. Значения токов и напряжений в экстремальных точках ОДС на ВАХ и их расположения по осям координат существенно зависят от амплитуды и частоты внешнего ВЧ сигнала. Причем частота и амплитуда, при которых появляется участок ОДС на ВАХ, его вид и протяженность по осям взаимосвязаны и взаимообусловлены. Так, на кривой 2 (рис. 1, *a*) при частоте 71 МГц типичное ОДС для этого диода появляется, если увеличить амплитуду ВЧ сигнала. Обратим внимание на то, что на кривых 2 и 3 (рис. 1, *a*) имеют место слабо выраженные участки ОДС N-типа на прямых ВАХ. В эксперименте ОДС N-типа на ВАХ появляется во всем интервале использованных частот (10–100 МГц), но наиболее выраженное для данного СВЧ диода — в области частот 40–80 МГц. Измерения показывают, что при приложении ВЧ сигнала к диоду вследствие эффекта детектирования в цепи возникает отрицательное падение напряжения порядка амплитуды

этого сигнала, и рабочая точка ВАХ смещается по оси абсцисс в сторону отрицательных напряжений на эту величину. В последующем, при приложении постоянного смещения и с ростом его величины, ток в цепи увеличивается, и его величина зависит от частоты ВЧ сигнала при заданной амплитуде на выходе ВЧ генератора. С ростом амплитуды треугольного напряжения смещения на диоде при заданной частоте и амплитуде ВЧ сигнала на ВАХ наблюдается резкий рост тока с последующим его плавным падением. Дальнейшее увеличение напряжения смещения приводит к новому росту тока, и прямая ветвь ВАХ практически совпадает с исходной ВАХ, снятой без ВЧ сигнала. В такой последовательности формируется N-образное ОДС на ВАХ. Характерная точка ВАХ I_{\max} , соответствующая максимуму тока на N-участке, с ростом частоты (рис. 1, *a*) перемещается в сторону отрицательных напряжений в заданном интервале частот по оси абсцисс, а в последующем стабилизируется при величине 0.1 В.

В случае, когда заданы частота 56 МГц (рис. 1, *b*) и постоянное смещение на диоде, при росте амплитуды ВЧ сигнала видно, что возникновение ОДС на ВАХ носит пороговый характер. С увеличением амплитуды

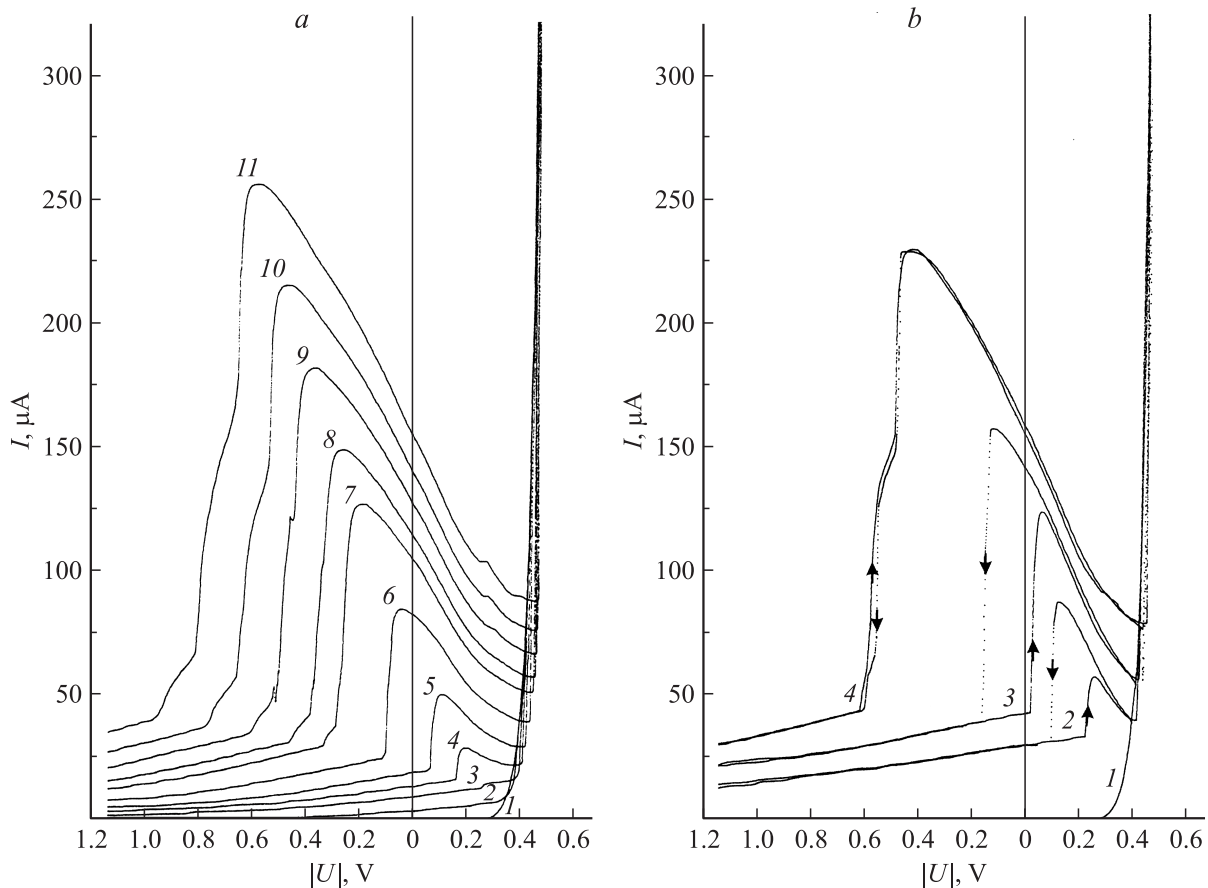


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики сверхвысокочастотного диода КА609Б: *a* — при заданной частоте высокочастотного сигнала 56 МГц с ростом амплитуды U , В: 1 — 0, 2 — 0.15, 3 — 0.3, 4 — 0.45, 5 — 0.6, 6 — 0.8, 7 — 1.1, 8 — 1.4, 9 — 1.7, 10 — 2.0, 11 — 2.3; *b* — гистерезис на вольт-амперных характеристиках диода А609Б при двух направлениях смещения и различных частотах, МГц: 1 — 0, 2 — 57, 3 — 59, 4 — 61; *c* — осцилляции на вольт-амперных характеристиках при заданной частоте высокочастотного сигнала 35 МГц и росте амплитуды сигнала U , В: 1 — 0, 2 — 0.2, 3 — 0.4, 4 — 0.6, 5 — 0.8, 6 — 1.0, 7 — 1.3, 8 — 1.5, 9 — 1.65, 10 — 1.90.

ВЧ сигнала обратный ток диода увеличивается. Далее следует резкий рост тока до высокопроводящего состояния I_{\max} , а затем ток плавно падает до I_{\min} с последующим новым ростом, полностью совпадающим с прямыми токами диода. Было замечено, что время переключения при N-образном спаде тока в значительной степени зависит от скорости нарастания пилообразного смещения.

Среди большого числа испытанных при этих же условиях СВЧ диодов перечисленные выше свойства были обнаружены в СВЧ диодах марки 1А403В (германиевый диффузионный, предназначенный для работы в параметрических усилителях и умножителях частоты в сантиметровом диапазоне) и КА609Б (кремниевый с мезоэпитаксиальной структурой). На рис. 2, *a* приведено семейство ВАХ для диода КА609Б при заданной частоте 62 МГц с ростом амплитуды ВЧ сигнала. Для этого типа диода свойственна большая протяженность по оси напряжений областей роста и спада N-участка, более плавный и осциллирующий характер кривой при росте тока к точке I_{\max} на ВАХ и более интенсивное смещение

этой точки в сторону отрицательных напряжений с ростом амплитуды ВЧ сигнала. При измерении ВАХ в двух направлениях смещения на диоде обнаружен сильно выраженный гистерезис при некоторых промежуточных значениях амплитуды ВЧ сигнала (рис. 2, *b*), который менее выражен для других типов диодов и исчезает при больших значениях амплитуд ВЧ сигнала. С уменьшением частоты ВЧ сигнала до 35 МГц на ВАХ диодов появляются осцилляции тока, ОДС практически исчезает и во всем интервале напряжений смещения наблюдается только рост тока с увеличением амплитуды ВЧ сигнала (рис. 2, *c*). В отличие от ступенчатых осцилляций, обнаруженных нами ранее в СВЧ диоде 1А403В на участке прямых токов [4], эти осцилляции менее выражены, но носят плавный характер и простираются во всем интервале напряжений смещения.

Анализ взаимодействия величин внешнего воздействия и собственной неравновесности исследуемой системы на падающем N-участке ВАХ проводился с помощью временных реализаций. Так, на рис. 3, *a* представлены осциллограммы переменного возмущения тока в

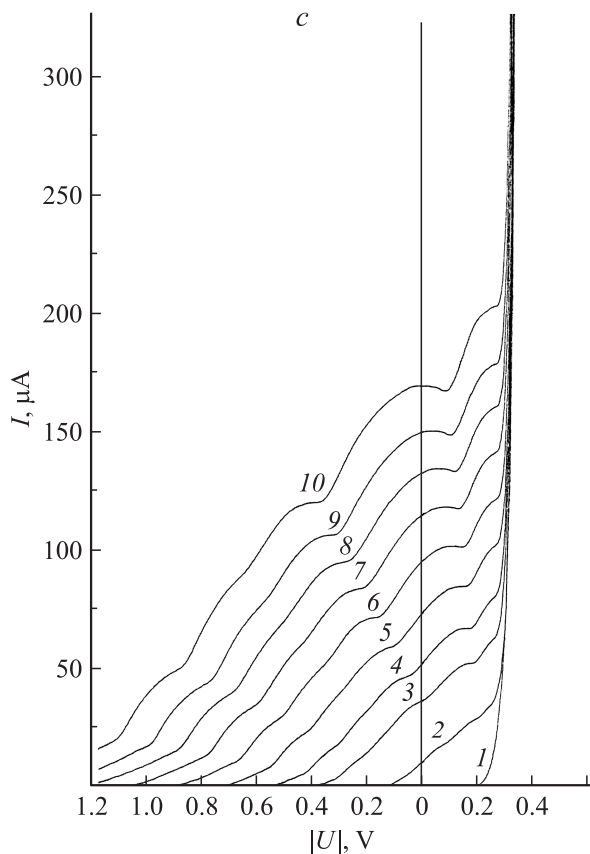


Рис. 2 (продолжение).

цепи при плавном увеличении постоянного смещения (сверху вниз) на падающем участке $I_{\max} - I_{\min}$ ВАХ, их фазовые портреты (рис. 3, *b*) и мощностные спектральные характеристики (рис. 3, *c*). В исследуемой системе при этом реализуется классический эволюционный сценарий перехода к хаотическому состоянию через последовательность бифуркаций удвоения периода (сценарий Фейгенбаума). Процесс переключения в низкопроводящее состояние происходит настолько плавно, что на опыте легко можно зафиксировать редко встречающиеся в нелинейных системах циклы периода 8 и более (рис. 3, *b*). С ростом смещения спектральные мощностные характеристики демонстрируют возникновение кратных частот, соответствующих этим циклам, и полосу сплошных шумов, характерных для хаотического состояния.

Известно [9], что воздействие внешнего сильного СВЧ поля на носители заряда в $p-n$ -переходе приводит к их разогреву и возникновению термоэдс горячих носителей, зависящей от температуры носителей и их концентрации. Было показано, что электронные процессы в кремниевых $p-n$ -переходах при разогреве носителей протекают иначе, чем в германиевых, так как в кремниевых переходах доминируют генерационно-рекомбинационные механизмы прохождения тока в области потенциального барьера, а в германиевых переходах основным является диффузионный механизм.

В эксперименте в германиевых переходах при малых обратных смещениях на ВАХ проявляется участок, где ток остается постоянным при изменении разности потенциалов, что объяснялось появлением отрицательной дифференциальной емкости контакта [10,11].

N-образная ВАХ была обнаружена в кремниевых $p-n$ -переходах в сильных СВЧ полях (10 ГГц, $2 \cdot 10^4$ Вт), когда E-компонента СВЧ поля была параллельна плоскости перехода [12]. Исследовались образцы двух типов: образцы типа I отличались от образцов типа II более высокой концентрацией бора и наличием дополнительно введенной примеси (никеля), создающей в переходе глубокие уровни. N-образный спад был обнаружен в образцах I типа, где нет глубоко лежащих уровней. В работе [5], где приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований эффекта возникновения ОДС N-типа в СВЧ диоде при воздействии на него мощным СВЧ сигналом (1 ГГц, 0.5 Вт), когда вектор СВЧ поля был ориентирован перпендикулярно плоскости $p-n$ -перехода, неоднозначно интерпретированы результаты работы [12] о том, что ОДС связано с большим количеством глубоких уровней в $p-n$ -переходе. В теоретических работах [13,14] подробно исследовано влияние модуляции высоты потенциального барьера $p-n$ -перехода в сильном СВЧ поле на токи и эдс горячих носителей. Показано, что модуляция потенциального барьера увеличивает рекомбинационные токи и может объяснить anomalously большие значения эдс и тока в $p-n$ -переходах. Учет высокочастотного возмущения поверхностного потенциала греющей волной в режиме тока короткого замыкания приводит к уменьшению эффективной высоты барьера. Следует отметить, что эдс $p-n$ -перехода и термоэдс в однородных частях диода имеют противоположные знаки, и поэтому полная эдс диода является суммой термоэдс горячих носителей $p-n$ -перехода, термоэдс горячих носителей в базах диода и эдс квазипотенциала, что приводит к возникновению вихревых токов в объеме образца [15].

Для объяснения различий наклона ВАХ для равновесных (без СВЧ сигнала) и неравновесных (при наличии СВЧ поля) $p-n$ -переходов при учете генерационно-рекомбинационных процессов было введено понятие коэффициента неидеальности $m > 1$ в аналитическое выражение для ВАХ

$$U = \frac{mkT}{e} \ln \left(\frac{I}{I_s} + 1 \right),$$

где I_s — ток насыщения, остальные обозначения общепринятые. Коэффициент неидеальности есть отношение полной высоты барьера к той его части, которую необходимо преодолеть носителю для рекомбинации. Значительные изменения коэффициента неидеальности, наблюдаемые экспериментально, считаются обусловленными изменением разности потенциалов в $p-n$ -переходе. В работе [5], где обнаружено и исследовано ОДС на ВАХ при СВЧ возмущении высокого уровня, экспериментальные условия наиболее близки к нашим.

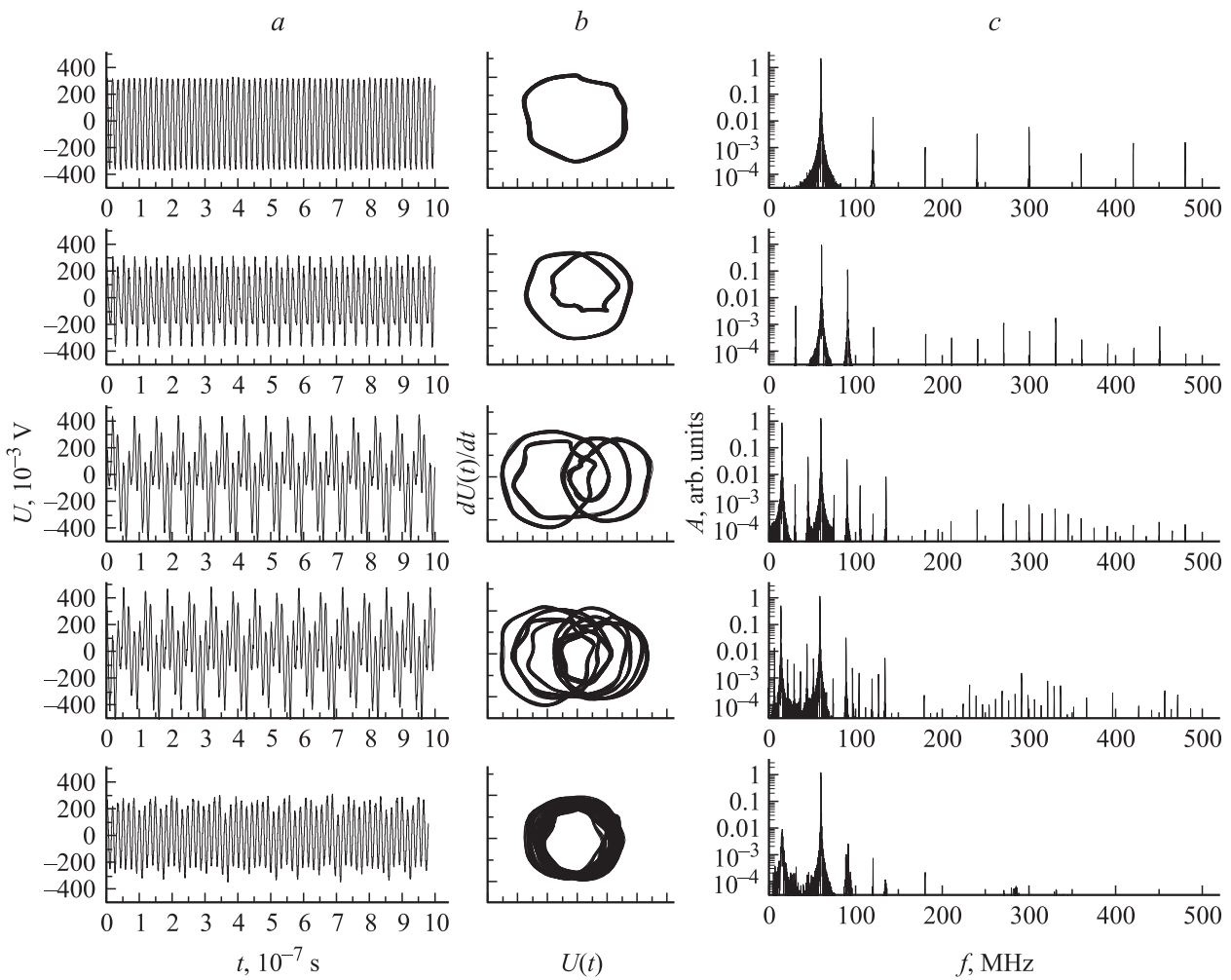


Рис. 3. Временные реализации (а), фазовые портреты (b) и спектральные характеристики (с) на падающем N-участке вольт-амперных характеристик диода 1A501B с ростом смещения.

Построенная авторами модель поведения СВЧ диода по соответствующей эквивалентной схеме протекания тока через диод приводила к выражению для ВАХ, полученному с учетом генерационно-рекомбинационных процессов в области пространственного заряда, проявляющихся в коэффициенте неидеальности m и эффекте разогрева носителей заряда:

$$I = \frac{qD_n n_{p0} S}{\sqrt{D_n \tau_n}} \left\{ \exp \left[\frac{qU_k}{mkT_0} \left(\frac{T_n - T_0}{T_n} \right) + \frac{qU_k}{mkT_n} \right] - 1 \right\} + \frac{qD_p p_{n0} S}{\sqrt{D_p \tau_p}} \left\{ \exp \left[\frac{qU_k}{mkT_0} \left(\frac{T_p - T_0}{T_p} \right) + \frac{qU_k}{mkT_p} \right] - 1 \right\},$$

где $D_n, D_p, \tau_n, \tau_p, T_n, T_p$ — коэффициенты диффузии, времена жизни и температуры электронов и дырок соответственно; T_0 — температура решетки; n_{p0}, p_{n0} — концентрации неосновных носителей; U_k — контактная разность потенциалов. Емкость C полупроводниковой структуры модели выражена в виде суммы барьерной C_b и диффузионной C_d емкостей $C_b + C_d$, а

ВАХ диода $I(U_D)$ определялась из решения уравнения $U_D = U_0 + IR$, где U_D — приложенное напряжение смещения, U_0 — величина постоянного напряжения на СВЧ диоде, R — постоянное низкоомное сопротивление. Насколько нам известно, теоретические и экспериментальные работы по исследованию процессов разогрева носителей тока в полупроводниках и структурах на их основе в частотном диапазоне 10–100 МГц отсутствуют. Но амплитуды ВЧ сигналов, использованных в эксперименте, достаточны для достижения электрических полей, разогревающих носители, при известных размерах p – n -переходов. ВЧ возмущение в нашем случае на порядок и более по частотам меньше, чем СВЧ сигналы, использованные в других экспериментах для разогрева носителей заряда. Обнаруженные ОДС N-типа на ВАХ, гистерезис и колебания на ВАХ можно интерпретировать следующим образом. При приложении ВЧ сигнала через p – n -переход проходит ток, обусловленный эффектом выпрямления, который создает падение напряжения на сопротивлении R , смещающий p – n -переход в обратном направлении. С ростом величины внешнего постоянного смещения ток через диод увеличивается.

Его величина определяется током инжекции ВЧ сигнала, величиной детектированного сигнала и внешним смещением. Когда растущее положительное напряжение по величине компенсирует обратное смещение, созданное падением переменного сигнала на сопротивлении R , в цепи возникает скачок тока на ВАХ с характерными временами порядка 10–100 мс, что приводит к уменьшению амплитуды переменного напряжения на диоде. При этом наблюдается резкий спад детектированного сигнала и, следовательно, уменьшение постоянного тока, протекающего через p – n -переход. Когда приложенное положительное смещение еще больше увеличивается, ВАХ диода принимает обычный вид, какой был в отсутствие ВЧ сигнала, но с более быстрым ростом прямого тока. Определенную роль при этом, безусловно, играет барьерная емкость p – n -перехода вследствие изменений, происходящих в ней из-за зависимости размеров области пространственного заряда от напряжения смещения и амплитуды ВЧ сигнала. При этом нелинейная зависимость величины емкости от напряжения — характерная особенность барьерной емкости, которая может привести к гистерезису при изменении направления тока, когда времена жизни носителей заряда, использованные частоты и времена изменения размеров области пространственного заряда являются величинами одного порядка. Через область пространственного заряда, играющего роль изолятора барьерной емкости, могут проходить как переменные токи смещения, так и токи проводимости. Это отличие барьерной емкости от емкости конденсатора при определенных частотах ВЧ сигнала может привести и к осцилляциям на ВАХ СВЧ диодов. Действительно, приложенное к СВЧ диоду переменное напряжение вызывает изменение размеров области пространственного заряда и, следовательно, величины заряда, что в свою очередь создает переменную составляющую электрического поля, а также переменный ток проводимости. Переменный ток проводимости обусловлен механизмами переноса и перераспределения рекомбинирующих неравновесных носителей заряда, и это отражается на диффузионной емкости диода. При прямом смещении барьерная емкость пренебрежимо мала, а диффузионная емкость составляет преобладающую часть общей емкости. При обратном смещении, наоборот, барьерная емкость становится преобладающей. В формировании тока через диод определенную роль играют рекомбинационные процессы носителей заряда в объеме квазинейтральных p - и n -областей перехода. Отсутствие информации о физических свойствах материала диодов и их конструктивно-технологических особенностях не позволяет однозначно рассуждать о механизмах обнаруженных явлений, но в отмеченных подклассах СВЧ и некоторых других диодов результаты хорошо воспроизводятся.

4. Заключение

В заключение отметим, что в СВЧ диодах при комнатных температурах на статических ВАХ при наложении высокочастотного сигнала большой амплитуды

обнаружены ОДС N-типа, гистерезис и осцилляции тока. Проведен сравнительный анализ с работами других авторов и обсуждены возможные механизмы обнаруженных явлений.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 09-02-00074а.

Список литературы

- [1] K.M. Aliev, I.K. Kamilov, Kh.O. Ibragimov, N.S. Abakarova. Sol. St. Commun., **148**, 171 (2008).
- [2] К.М. Алиев, И.К. Камиллов, Х.О. Ибрагимов, Н.С. Абакарова. ФТП, **43**, 517 (2009).
- [3] К.М. Алиев, И.К. Камиллов, Х.О. Ибрагимов, Н.С. Абакарова. ЖТФ, **81**, 141 (2011).
- [4] К.М. Алиев, И.К. Камиллов, Х.О. Ибрагимов, Н.С. Абакарова. Письма ЖТФ, **37**, 42 (2011).
- [5] Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Н.В. Угрюмова. ФТП, **32**, 1399 (1998).
- [6] Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Н.В. Угрюмова. Письма ЖТФ, **25**, 42 (1999).
- [7] Г.Е. Пикус. *Основы теории полупроводниковых приборов* (М., Наука, 1965).
- [8] Л. Росадо. *Физическая электроника и микроэлектроника* (М., Высш. шк., 1991). [Пер. с исп. С.И. Баскакова, под ред. проф. В.А. Терехова.]
- [9] А.И. Вейнгер, Л.Г. Парицкий, Э.А. Акоюян, М.Г. Дадамирзаев. ФТП, **9**, 219 (1975).
- [10] А.И. Вейнгер. ФТП, **12**, 1986 (1978).
- [11] А.И. Вейнгер, С.В. Гнилов, М.П. Саргсян. ФТП, **13**, 318 (1979).
- [12] Н.А. Аблязимова, А.И. Вейнгер, В.С. Питанов. ФТП, **22**, 2001 (1988).
- [13] Г. Гулямов. ФТП, **30**, 1279 (1996).
- [14] Г. Гулямов, М.Г. Дадамирзаев, С.Р. Бойдедаев. ФТП, **34**, 572 (2000).
- [15] С.Х. Шамирзаев, Г. Гулямов, М.Г. Дадамирзаев, А.Г. Гулямов. ФТП, **45**, 1065 (2011).

Редактор Т.А. Полянская

N-type negative differential conductivity, hysteresis and oscillations on the current–voltage characteristics of microwave diodes

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

Amirkhanov Institute of Physics,
Russian Academy of Science,
367003 Makhachkala, Russia

Abstract Current–voltage characteristics of microwave diodes have been investigated experimentally at a direct current when an external harmonic high-frequency signal with large amplitude is imposed simultaneously to the samples. Current oscillations, N-type segments with negative differential resistance and hysteresis have been found on the current–voltage characteristics of microwave diodes depending on amplitude and frequency of high frequency signal. Obtained results and possible mechanisms of observed phenomena are discussed.