

06

Ступенчатые осцилляции тока в туннельных и высокочастотных диодах

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

Институт физики им. Х.И. Амирханова ДНЦ РАН, Махачкала
E-mail: abakarova_naida@mail.ru

Поступило в Редакцию 4 марта 2011 г.

Экспериментально исследован отклик туннельных и высокочастотных диодов на внешний гармонический сигнал большой амплитуды. На вольт-амперных характеристиках, измеренных на постоянном токе при наложении внешнего высокочастотного сигнала, обнаружены ступенчатые осцилляции тока, частота которых уменьшается с ростом частоты внешнего сигнала. Приведены аналоги механизма возникновения ступенчатых осцилляций тока в полупроводниковых и других структурах.

Известно, что воздействие гармонического сигнала $U_{\sim} = U_i e^{i\omega t}$ на диодные структуры с p - n -переходом в состоянии прямого или обратного их смещения по постоянному току может качественным образом изменить вид стандартных вольт-амперных характеристик (ВАХ) [1–5] образцов. Теоретический анализ для случая малосигнальной модели диода, когда $U_1 = kT/e$ ($U_1 \approx 26$ мВ при 300 К), а нелинейность и неравновесность системы обусловлены напряжением смещения, проведен в [6–7]. Импульсные и частотные характеристики диодных структур в данном приближении подробно изучены в зависимости от толщины базы, степени легирования, частоты приложенного сигнала, уровня инжекции и эффективности концентрации центров рекомбинации [6–7].

При исследовании отклика нелинейных систем на внешние когерентные и шумовые возмущения большой амплитуды был обнаружен целый ряд нетривиальных явлений: многозначности на ВАХ, эффект абсолютного отрицательного сопротивления, Z-образные участки на ВАХ [1–5], что стимулирует дальнейшие исследования в этом направлении.

В данном сообщении приводятся результаты экспериментального изучения отклика туннельных и некоторых высокочастотных (ВЧ) диодов серийного производства и общего применения на внешние синусоидальные возмущения большой амплитуды. Схема измерения

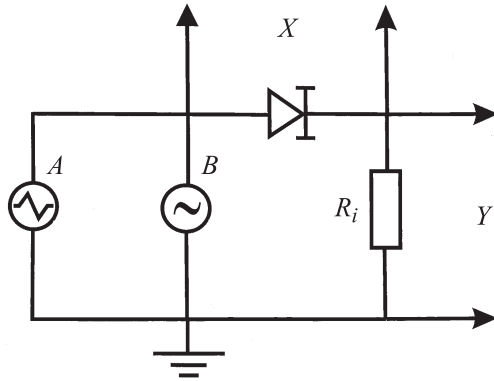


Рис. 1. Схема эксперимента: A — генератор Г6-15, B — Г4-158.

(рис. 1) включает в себя источник питания с низким внутренним сопротивлением или генератор сигнала специальной формы Г6-15, ограничительный резистор $R_i = 5-150 \Omega$ и ВЧ-генератор Г4-158. ВАХ в режиме постоянного или медленно меняющегося тока регистрировались двухкоординатным самопишущим потенциометром, 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. ВАХ исследованных структур, полученные как в импульсном режиме, так и на постоянном токе, показали их полную идентичность и отсутствие каких-либо различий, связанных с джоулевым разогревом.

На рис. 2 приведены семейства прямых и обратных ВАХ туннельных диодов АИ-201 (рис. 2, a) и АИ301Б (рис. 2, b), снятые на треугольных импульсах с длительностью $\tau = 10$ с, при одновременном наложении на диоды переменного синусоидального напряжения с ростом его амплитуды при 300 К. Частоты переменного сигнала изменялись в пределах 1–10 МГц в зависимости от типа диода. Увеличение амплитуды ВЧ-сигнала, как мы показали ранее [3–5], приводит к резким изменениям ВАХ диодов:

— наблюдается значительное уменьшение туннельного тока, приводящее к перемещению туннельной составляющей прямой ветви ВАХ из

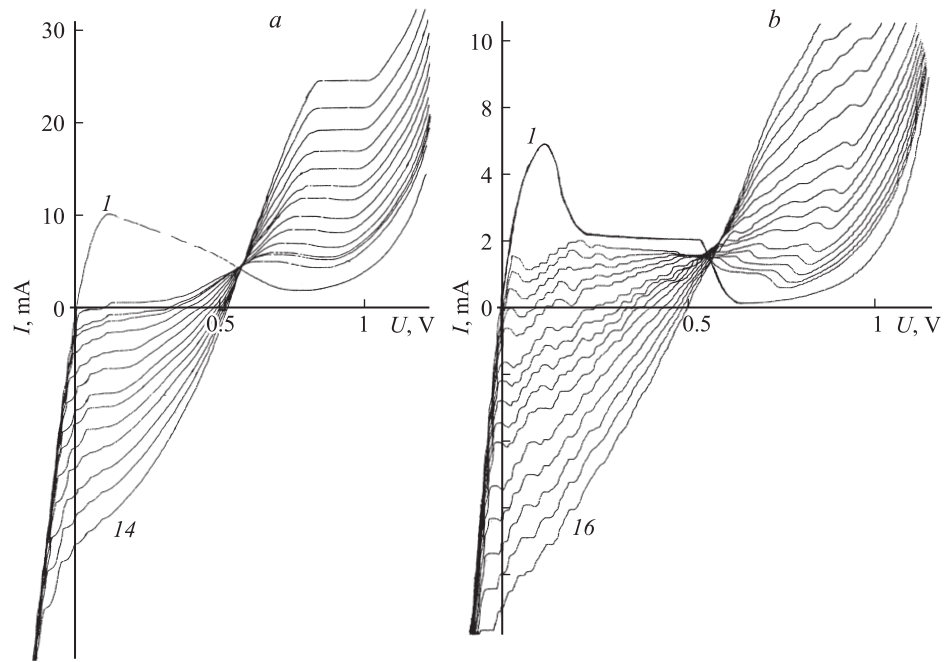


Рис. 2. Статические ВАХ туннельных диодов при частоте 4 МГц и росте амплитуды возмущения U (V) (сверху вниз). *a*: 1 — 0; 2 — 0.45; 3 — 0.6; 4 — 0.69; 5 — 0.74; 6 — 0.83; 7 — 0.92; 8 — 1.1; 9 — 1.2; 10 — 1.34; 11 — 1.47; 12 — 1.6; 13 — 1.75; 14 — 1.9 (диод АИ-201); *b*: 1 — 0; 2 — 0.33; 3 — 0.375; 4 — 0.42; 5 — 0.47; 6 — 0.52; 7 — 0.57; 8 — 0.65; 9 — 0.73; 10 — 0.83; 11 — 0.93; 12 — 1.07; 13 — 1.24; 14 — 1.47; 15 — 1.63; 16 — 1.76 (диод АИ-301Б).

первого квадранта системы $I-V$ координат в четвертый, т.е. к эффекту абсолютного отрицательного сопротивления;

— происходит резкий рост избыточной и диффузионной составляющих полного тока туннельного диода;

— чисто туннельные обратные ВАХ диода, как видно на рис. 2, *a*, *b*, претерпевают неординарное смещение („затягивание“) из 3-го в 4-й квадрант системы $I-V$ координат;

— в диапазоне использованных в эксперименте частот (1–10 МГц) в исследованных диодах на статических ВАХ не наблюдаются выраженные многозначности, т.е. несколько N -участков, кроме тенденции к ним (рис. 1, *b*), и другие структуры, характерные для более высоких частот, о которых сообщалось ранее [3,4].

При подборе соответствующей частоты и некоторого порогового значения переменного сигнала на статических ВАХ возникают ступенчатые осцилляции тока, которые неодинаково выражены для всех исследованных диодов и разнятся в зависимости от марки и конструктивно-технологических особенностей диодов. Так, для туннельно-сплавного диода АИ-201, предназначенного для работы в генераторах (рис. 2, *a*), колебания выражены значительно меньше, чем для переключающих диодов АИ301Б, где они проявляются более интенсивно по амплитуде и в более широком диапазоне рабочих напряжений диода, вплоть до диффузионных составляющих общего тока. Второй тип диодов демонстрирует ВАХ со ступенчатым переключением на N -участке, что свойственно диодам, у которых в запрещенной зоне и в $p-n$ -переходе имеются локализованные уровни, и туннелирование электрона из зоны проводимости в валентную зону происходит не прямо, а через локальный уровень. При достаточно большой концентрации локализованных уровней различных типов переход осуществляется поэтапно. Такие диоды характеризуются так называемой внутренней бистабильностью (intrinsic bistability). Отметим, что для исследованных диодов характерен колебательный режим, когда нагрузочное сопротивление в цепи подобрано равным по величине отрицательному сопротивлению диода, а диапазон собственных частот при этом находится в пределах 2.5–12 МГц.

К характерным особенностям обнаруженных ступенчатых осцилляций на статических ВАХ диодов (рис. 2, *a*, *b*) можно отнести следующие:

— колебания носят пороговый характер в зависимости от амплитуды внешнего ВЧ-сигнала;

— частота колебаний уменьшается с ростом частоты внешнего сигнала, и для туннельных диодов ступени проявляются только в интервале частот приложенного сигнала 0.5–15 МГц.

— порог колебаний минимален в области чисто туннельного переноса тока;

— при соответствующем подборе частоты и амплитуды внешнего возмущения осцилляции на ВАХ простираются вплоть до диффузионной составляющей полного тока туннельного диода (рис. 2, *b*);

— дальнейший рост амплитуды внешнего возмущения приводит к подавлению осцилляций при больших значениях постоянного напряжения, хотя в области чисто туннельного переноса тока осцилляции сохраняются;

— статические ВАХ всех исследованных диодов при наложении внешнего гармонического возмущения пересекаются в одной точке (рис. 2, *a*) или в небольшой окрестности этой же точки (рис. 2, *b*), расположенной в области истощения туннельной составляющей и в начале избыточной части общего тока;

— уменьшение температуры от 300 до 77 К не вносит существенных изменений ни в осцилляции тока, ни в перечисленные выше особенности поведения ВАХ, что предсказуемо для вырожденных систем, каковыми и являются *p*- и *n*-области туннельного диода.

Определенную роль в формировании ступеней на ВАХ играет соотношение величины внешнего воздействия и собственной неравновесности системы. Так, на рис. 3 представлена осциллограмма переменного возмущения тока на образце при заданном значении постоянного напряжения на диоде АИЗ01Б (рис. 3, *a*), его спектральная мощностная характеристика (рис. 3, *b*) и фазовый портрет (рис. 3, *c*) при частоте 4 МГц. Хорошо видны возникновение утроенного цикла, кратных гармоник большой мощности и другие характерные черты, свойственные нелинейному взаимодействию.

Аналогичные ступени на ВАХ были обнаружены и в некоторых ВЧ-диодах, но при больших частотах (50–100 МГц). Так, на рис. 4 представлена серия прямых ВАХ для диода 1А402В с ростом амплитуды внешнего сигнала при частоте 66 МГц. В отличие от туннельных диодов, где ступени на ВАХ существуют в сравнительно широкой области частот (2–10 МГц), в ВЧ-диодах этот интервал резко сужается (65–67 МГц). Для данного диода с ростом амплитуды на ступенях появляются впадины, проявляющиеся на ВАХ как N-образные участки.

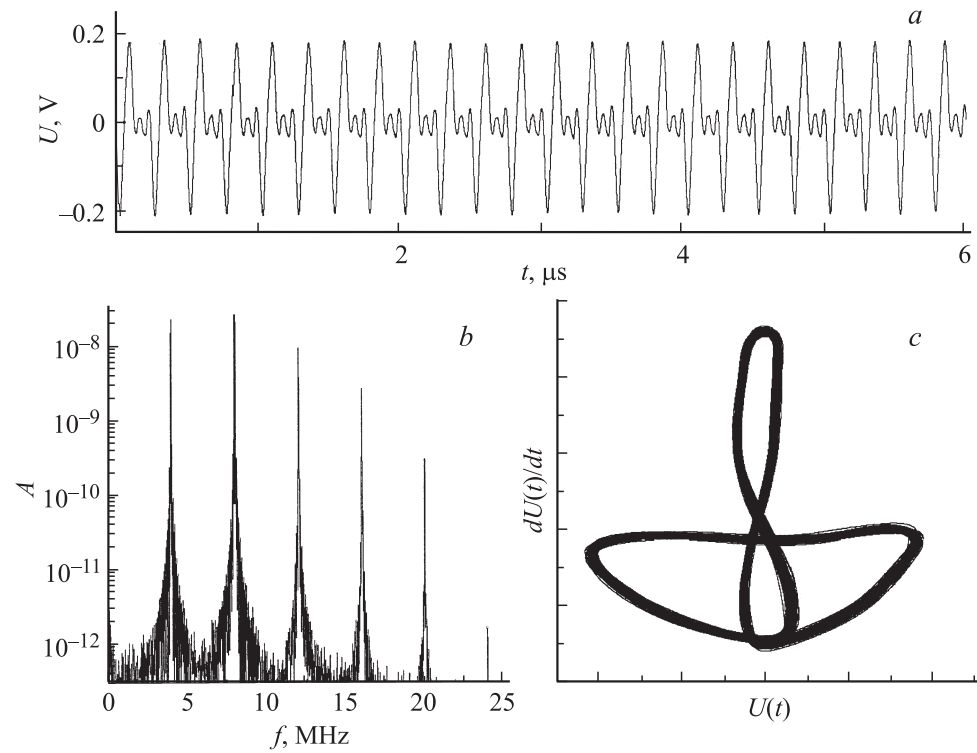


Рис. 3. *a* — временная реализация переменного внешнего возмущения при заданном значении постоянного напряжения на диоде; *b* — спектральная мощностная характеристика; *c* — фазовый портрет (диод АИ-301Б).

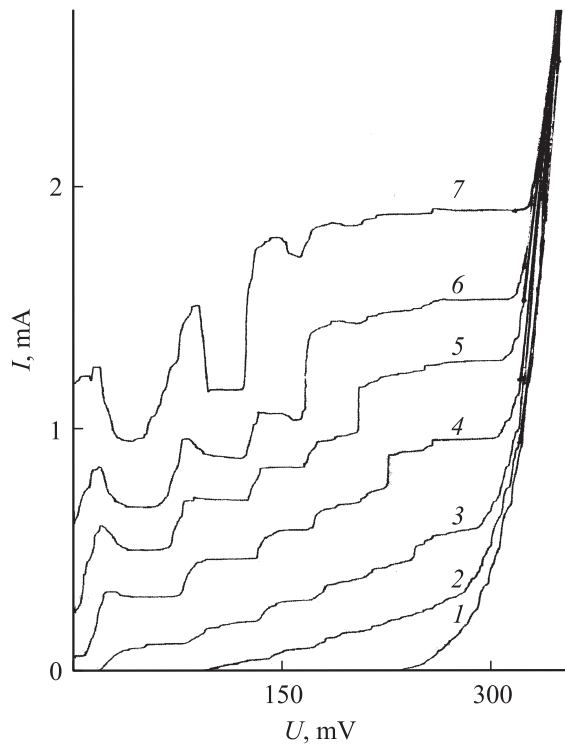


Рис. 4. Прямые статические ВАХ ВЧ-диода 1А402В при увеличении амплитуды возмущения U_{\sim} (V) (снизу вверх): 1 — 0; 2 — 0.076; 3 — 0.110; 4 — 0.140; 5 — 0.196; 6 — 0.240; 7 — 0.360.

При бóльших значениях приложенного постоянного напряжения ВАХ становятся пологими. Отметим, что в ВЧ-диодах 2В124А, КД413А, КД514А и обращенных диодах 1И401Б осцилляции не обнаружены в частотном диапазоне до 100 МГц.

Такие ступенчатые осцилляции тока известны давно, и с ними связан значительный прогресс в физике конденсированного состояния: эффект Джозефсона (степени Шапиро) [8,9] и кулоновская блокада туннелирования [10,11]. В отсутствие магнитного поля включать в перечень квантовый эффект Холла не следует.

Известно, что в джозефсоновском переходе, когда постоянный внешний ток I больше критического тока перехода, возникает напряжение U , периодически зависящее от времени [8], так называемая джозефсоновская генерация $I = I_c \sin \varphi$, где φ — скачок фазы на переходе. При СВЧ-воздействии происходит синхронизация внешним полем, и при изменении тока через переход напряжение остается неизменным, а на ВАХ образуется ступенька напряжения. Причем

$$2eV = n\hbar\omega,$$

где V — ширина ступени Шапиро, ω — частота внешнего СВЧ-воздействия. Отсюда следует, что с ростом частоты ширина ступени должна расти, что мы и наблюдаем в туннельных диодах.

Лихарев К.К. в своем обзоре [12] отмечает, что эффект Джозефсона не связан непосредственно со сверхпроводящим туннелированием и туннельные переходы являются лишь одной из систем, обладающих данным эффектом, что и было продемонстрировано в работах по экспериментальному наблюдению дискретно коррелированного одноэлектронного туннелирования и многих других эффектов квантования сопротивления [10,11]. Резонансное упругое туннелирование электронов в различных материалах и конфигурациях, где сформированы фиксированные потенциальные барьеры (гетероструктуры, МОП-структуры, одномерные и двумерные потенциальные ямы, туннельные контакты), наблюдают в форме пиков или ступеней на ВАХ и интерпретируют как макроскопические квантово-механические эффекты при кулоновской блокаде [10,11]. При всем разнообразии перечисленных выше квантово-механических явлений отметим, что все они наблюдались при низких температурах. В опубликованной литературе нами не найдены работы, в которых сообщалось бы о ступенчатых осцилляциях на ВАХ при 300 К.

В туннельных диодах, по-видимому, при наложении внешнего ВЧ-когерентного возмущения большой амплитуды возможны механизмы, связанные с переносом носителей через p - n -переход, с участием или без локализованных примесных уровней, когда может иметь место кулоновская блокада под воздействием приложенного возмущения. При этом нельзя не учитывать смещение самих зон, уровней Ферми F_n и F_p , поведение хвостов плотности состояний, изменение распределения электрического поля, а также собственные частоты, емкостные и индуктивные характеристики диода в зависимости от амплитуды и частоты возмущающего сигнала.

Что касается образования ступенек на ВАХ ВЧ-диодов, авторы не обладают полной информацией о конструктивно-технологических особенностях и физических свойствах исходного полупроводникового материала диодов, и в работе приводится хорошо воспроизводимый экспериментальный факт.

В заключение отметим, что впервые при комнатных температурах на статических ВАХ туннельных и некоторых ВЧ-диодов обнаружены ступенчатые осцилляции тока и предложены аналоги возможных механизмов их возникновения.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 09-02-00074а и НШ-4526.2008.2.

Список литературы

- [1] Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Узрюмова Н.В. // ФТП. 1998. Т. 32. С. 1399.
- [2] Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Узрюмова Н.В. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 1. С. 42.
- [3] Aliiev K.M., Kamilov I.K., Ibragimov Kh.O., Abakarova N.S. // Sol. St. Comm. 2008. V. 148. P. 171.
- [4] Алиев К.М., Камилов И.К., Ибрагимов Х.О., Абакарова Н.С. // ФТП. 2009. Т. 43. С. 517.
- [5] Алиев К.М., Камилов И.К., Ибрагимов Х.О., Абакарова Н.С. // ЖТФ. 2011. Т. 81. С. 141.
- [6] Ликс Г.Е. Основы теории полупроводниковых приборов. М., 1965.
- [7] Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника. М., 1991.
- [8] Josephson B.D. // Phys. Lett. 1962. V. 1. P. 251; Rev. Mod. Phys. 1964. V. 36. P. 221.
- [9] Shapiro S. // Phys. Rev. Lett. 1963. V. 11. P. 80.
- [10] Демиховский В.Я., Вугальтер Г.А. Физика квантовых низкоразмерных структур. М., 2000.
- [11] Кравченко А.Ф., Овсяк В.Н. Электронные процессы в твердотельных системах пониженной размерности. Новосибирск, 2000.
- [12] Лихарев К.К. // УФН. 1979. Т. 127. С. 185.