

05:06

Проводимость полупроводниковых диодов при одновременном воздействии на них постоянного и переменного напряжения

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

Институт физики им. Х.И. Амирханова ДНЦ РАН,
367003 Махачкала, Россия
e-mail: abakarova_naida@mail.ru

(Поступило в Редакцию ЖТФ 27 апреля 2010 г. В окончательной редакции 21 июля 2010 г.)

Приведены результаты экспериментального исследования влияния высокочастотного сигнала большой амплитуды на поведение статических вольт-амперных характеристик (ВАХ) полупроводниковых диодов серийного производства с $p-n$ -переходом. Обнаружены S -образные участки на прямых ветвях ВАХ, наблюдаемые в широком интервале частот, а также колоколообразный участок на обратных ветвях ВАХ, величина и расположение которого по оси напряжений существенно зависят от частоты переменного сигнала.

Как известно, воздействие гармонического сигнала $U_{\sim} = U_1 e^{i\omega t}$ на диодные структуры с $p-n$ -переходом в состоянии прямого или обратного смещения U_0 может качественным образом изменить вид их стандартных вольт-амперных характеристик (ВАХ) [1–4].

Подобная ситуация проанализирована теоретически [5,6] для случая малосигнальной модели диода, когда $U_1 = kT/e$ ($U_1 \approx 26$ мВ при 300 К) и колебания можно считать синусоидальными, а нелинейность и неравновесность системы обусловлены лишь напряжением смещения. Импульсные и частотные характеристики диодных структур в данном приближении изучены достаточно подробно в зависимости от толщины базы, частоты приложенного сигнала, уровня инжекции и эффективности концентрации центров рекомбинации [5,6]. Насколько нам известно, публикации экспериментальных результатов исследования одновременного воздействия постоянного и переменного напряжения большой ($U_1 \gg kT/e$) амплитуды в широком интервале частот отсутствуют.

При изучении отклика нелинейных систем на внешние когерентные и шумовые возмущения, такие как детерминированный стохастический резонанс [4], абсолютное отрицательное сопротивление [7] и другие пространственно-временные эффекты [7–10], был обнаружен целый ряд новых нетривиальных явлений, что стимулирует дальнейшие исследования $p-n$ -переходов в этом направлении.

В данной работе приведены результаты экспериментального исследования влияния внешнего сигнала на диоды серийного производства: точечные Д2Ж и ГД511А, сплавные Д206, микросплавные Д104, диффузионные МД217, мезапланарные 2Д115, импульсные Д312 и ГД402А, эпитаксиально-планарные 2Д413А, стабилитроны Д814В и КС133А. ВАХ диодов изучались на установке (рис. 1), схема которой содержит исследуемый диод, источник питания с низким внутренним сопротивлением, ограничительный резистор $R_i = 5\text{--}200 \Omega$, ВЧ-генератор Г4-158И и генератор шумов Г2-59 для наложения внешних возмущений на образец. Для получения ВАХ в режиме постоянного или медленно меняющегося тока использовался двух-

координатный самопишущий потенциометр, в импульсном режиме — осциллограф. Аналоговый сигнал вводился в компьютер с помощью специального аппаратного интерфейса, состоящего из двух независимых аналого-цифровых преобразователей (АЦП) с частотой выборки 10 МГц и 1 ГГц для работы в постоянно высокочастотном (ВЧ) режиме соответственно.

Необходимо сделать следующее методическое замечание. При подключении диода к двум источникам питания по данной схеме переменное напряжение на диоде возрастает не сразу, а вместе с постоянным, сначала плавно, а потом выходит на насыщение, т.е. на заданное амплитудное значение. Для сравнения нами были проведены измерения и при последовательном подключении источников смещения к диоду.

Измерения проводились и в импульсном режиме. Напряжение смещения U подавалось на образец либо в форме треугольных импульсов с амплитудой от $-U$ до $+U$, либо в форме пилообразных импульсов. Переменный гальванически развязанный сигнал заданной амплитуды и частоты подключался к самому диоду. Динамика переходных процессов изучалась на прямоугольных импульсах напряжения длительностью $\tau = 50\text{--}1000 \mu\text{s}$. ВАХ диодов в отсутствие внешнего сигнала, полученные как в импульсном режиме, так и на постоянном токе, показали их полную идентичность и отсутствие каких-либо различий, связанных с джоулевым разогревом исследуемых структур.

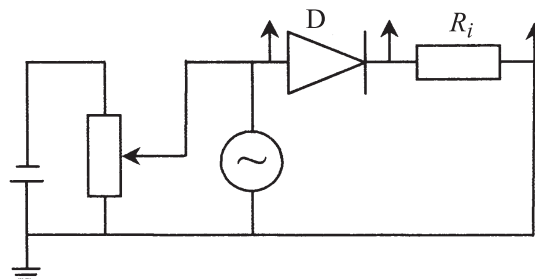


Рис. 1. Схема подключения диода.

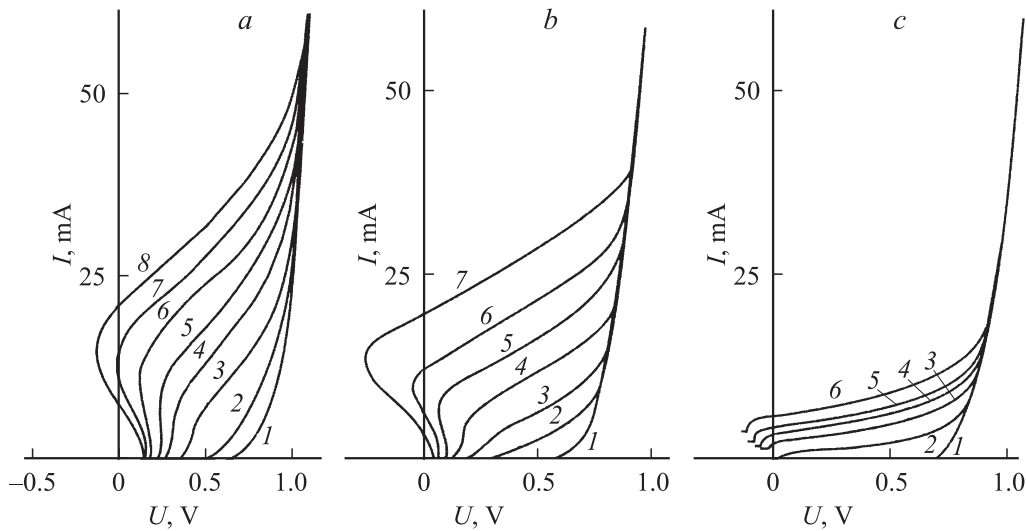


Рис. 2. Семейство прямых ветвей статических ВАХ диода Д-104 при росте амплитуды U_{\sim} и различных значениях частоты: *a* — $f = 100$ kHz и U_{\sim} (V): 1 — 0; 2 — 0.4; 3 — 0.6; 4 — 0.9; 5 — 1.1; 6 — 1.35; 7 — 1.6; 8 — 1.85; *b* — $f = 1$ MHz и U_{\sim} (V): 1 — 0; 2 — 0.75; 3 — 1.1; 4 — 1.5; 5 — 1.8; 6 — 2.3; 7 — 3.0; *c* — $f = 5$ MHz и U_{\sim} (V): 1 — 0; 2 — 1.8; 3 — 2.4; 4 — 2.75; 5 — 3.1; 6 — 3.5.

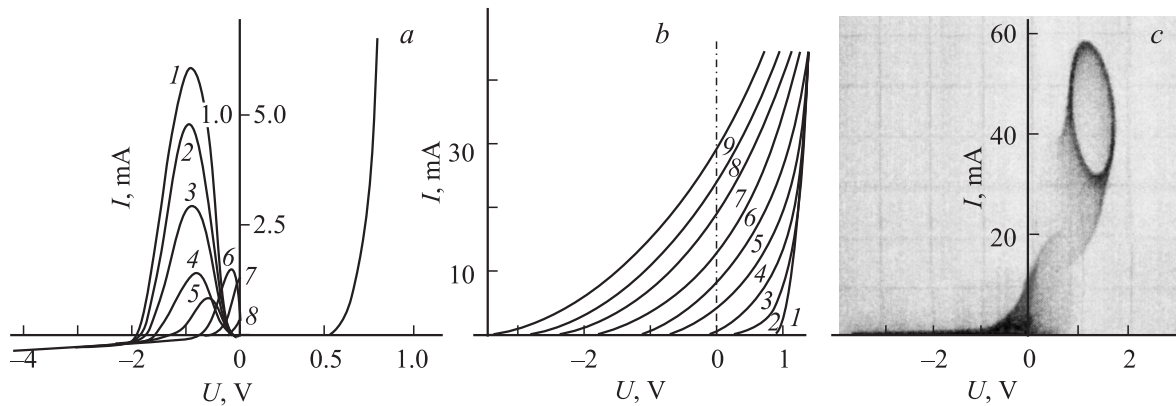


Рис. 3. ВАХ диода Д-104: *a* — при заданном значении амплитуды $U_{\sim} = 1.0$ V с ростом частоты f (MHz): 1 — 0.1; 2 — 0.05; 3 — 0.2; 4 — 0.4; 5 — 1.2; 6 — 5; 7 — 6; 8 — 10; *b* — при переменном сигнале с частотой $f = 200$ kHz в случае отключения ограничительного резистора с ростом амплитуды U_{\sim} (V): 1 — 0; 2 — 0.8; 3 — 1.4; 4 — 1.8; 5 — 2.2; 6 — 2.5; 7 — 2.8; 8 — 3.2; 9 — 3.7; *c* — в импульсном режиме при $U_{\sim} = 1.5$ V и $f = 500$ kHz.

Представленные результаты получены для всех перечисленных выше типов диодов. Обнаруженные эффекты качественно совпадают для всех образцов, а количественные расхождения связаны с порогом S -переключения либо с частотными особенностями самих диодов.

На рис. 2 изображены семейства ВАХ диода Д-104 в прямом направлении, полученные в режиме постоянного смещения. Величина напряжения ВЧ-сигнала с частотой $f = 100$ kHz изменялась от 0 до 2 V. При малом значении амплитуды переменного сигнала наблюдается рост тока в некотором интервале напряжений, определяемом соотношением приложенного постоянного смещения и амплитудой переменного сигнала (рис. 2, *a*, кривые 2–5). Дальнейшее увеличение амплитуды переменного напряжения приводит к резкому росту тока

(рис. 2, *a*, кривая 4), вплоть до проявления S -образного участка (рис. 2, *a*, кривые 6–8), и к неординарному смещению („затягиванию“) ВАХ с S -переключением во второй квадрант системы I – V координат, пока растущее напряжение не возвратит характеристику снова в первый квадрант. Необходимо отметить, что в области больших прямых смещений кривые семейства полностью совпадают с характеристикой, полученной при нулевом значении переменного напряжения.

С увеличением частоты переменного сигнала f до 1 MHz (рис. 2, *b*) влияние его амплитуды качественно аналогично случаю $f = 100$ kHz (рис. 2, *a*), с той разницей, что совпадение кривых происходит при меньших токах. Наложение переменного сигнала с частотой $f = 5$ MHz и выше приводит к менее выраженному росту прямого тока и, в зависимости от амплитуды

сигнала, возникновению постоянной составляющей во втором квадранте координатных осей (рис. 2, *c*).

На рис. 3 приведены семейства обратных ветвей ВАХ. Когда приложенная к диоду частота варьируется в диапазоне 0.01–10 МГц (рис. 3, *a*), в определенном интервале напряжений наблюдается „колоколообразное поведение“ кривых ВАХ. Причем значения максимума кривых существенно зависят от частоты сигнала, а сам максимум с увеличением частоты смещается в сторону малых напряжений по постоянному току. Для сравнения здесь же показана и прямая ветвь ВАХ того же диода при $U_{\sim} = 0$. Как и в предыдущем случае, с ростом смещения кривые обратных ветвей ВАХ сливаются в одну.

Для излучения влияния внешнего сигнала на проводимость диодов использовалась и другая методика. Треугольные импульсы напряжения длительностью $\tau = 10\text{--}30\text{ с}$ прикладывались к диоду в качестве медленно меняющегося смещения. Одновременно к диоду прикладывалось гальванически развязанное переменное напряжение с заданной частотой и амплитудой. Результаты измерений при $f = 0$ и 200 кГц при разных амплитудах переменного сигнала представлены на рис. 3, *b*. Рост тока, обусловленный наложением выпрямленного тока на ток слабо меняющегося постоянного смещения, во втором квадранте плавно уменьшается и достигает своего нулевого значения в точке оси напряжений, соответствующей разности прямых и обратных смещений.

Заметим, что отсутствие на ВАХ *S*-переключений обусловлено не только тем, что переменное напряжение приложено к диоду и гальванически развязано, но и перераспределением суммарного постоянного и переменного напряжения смещения между диодом и ограничительным резистором R_i . Исследования, проведенные в импульсном режиме (пилообразное смещение), продемонстрировали (рис. 3, *c*) возникновение отрицательного дифференциального сопротивления *S*-типа на ВАХ при достаточной величине сопротивления резистора R_i , т.е. при измерениях, близких к режиму „генератора тока“.

В отличие от предыдущих наших исследований в туннельных диодах [4], воздействие шумового сигнала с эффективной амплитудой до 3 В в частотном диапазоне до 6.5 МГц на диоды показало практически полную его идентичность воздействию гармонического сигнала и не обнаружило других существенных изменений на ВАХ.

Отметим также, что аналогичное проявление *S*-участков на ВАХ было обнаружено ранее в планарно-эпитаксиальных диодах под действием СВЧ излучения [2].

Экспериментально обнаружено возникновение на ВАХ целого ряда полупроводниковых диодов отрицательного дифференциального сопротивления *S*-типа при одновременном воздействии на *p*–*n*-переход постоянного и переменного сигналов одного порядка по величине в широком частотном диапазоне.

Обнаруженный эффект представляется важным как для более глубокого понимания физики взаимодействия ВЧ-сигнала с полупроводниковыми структурами, так и

для возможного использования данного факта в качестве *S*-переключателя.

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

Список литературы

- [1] Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Угрюмова Н.В. // ФТП. 1998. Т. 32. Вып. 11. С. 1399.
- [2] Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Угрюмова Н.В. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 1. С. 42.
- [3] Aliev K.M., Kamilov I.K., Ibragimov Kh.O., Acakarova N.S. // Solid State Commun. 2008. Vol. 148. P. 171.
- [4] Алиев К.М., Камиллов И.К., Ибрагимов Х.О., Абакарова Н.С. // ФТП. 2009. Т. 43. Вып. 4. С. 517.
- [5] Пикус Г.Е. Основы теории полупроводниковых приборов. М.: Наука, 1965. 448 с.
- [6] Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника. М.: Высш. шк., 1991. 351 с.
- [7] Камиллов И.К., Алиев К.М., Ибрагимов Х.О., Абакарова Н.С. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 4. С. 25.
- [8] Mantegna R.N., Spagnola B. // Phys. Rev. E. 1994. Vol. 49. P. R 1792.
- [9] Анищенко В.С., Нейман А.Б., Мосс Ф., Шиманский-Гейер Л. // УФН. 1999. Т. 169. С. 7.
- [10] Шёлль Э. Самоорганизация в полупроводниках. М.: Мир, 1991. 464 с.