

Возникновение отрицательного сопротивления в структурах на основе $p-n$ -перехода в СВЧ поле

© Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Н.В. Угрюмова

Саратовский государственный университет,
410026 Саратов, Россия

(Получена 15 сентября 1997 г. Принята к печати 28 мая 1998 г.)

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований эффекта возникновения отрицательного дифференциального сопротивления диодных структур на основе $p-n$ -перехода при воздействии на них высокого уровня СВЧ мощности. При теоретическом анализе влияния высокого уровня СВЧ мощности на вид вольт-амперной характеристики диода учитывается изменение постоянной составляющей тока, протекающего через $p-n$ -структуру, вследствие разогрева свободных носителей заряда и детекторного эффекта.

Введение

Воздействие сильного СВЧ поля оказывает существенное влияние на характеристики токопереноса в структурах на основе $p-n$ -переходов. Например, при воздействии СВЧ мощности высокого уровня существенно изменяются стационарные вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодов вследствие появления значительного термотока горячих носителей заряда через $p-n$ -переход [1].

Сопоставление экспериментальных данных с результатами расчета ВАХ, полученными с учетом возникновения термотока горячих носителей заряда в $p-n$ -переходе [1], показало их достаточно хорошее соответствие лишь для германиевых $p-n$ -переходов. Для объяснения "аномально" больших токов в сильном СВЧ поле в кремниевых $p-n$ -переходах наряду с учетом термотока горячих носителей заряда используется генерационно-рекомбинационная модель токопереноса в слое объемного заряда [2–4].

В известных к настоящему времени экспериментальных работах [3,5] показано, что воздействие сильного СВЧ поля может приводить и к качественному изменению ВАХ диодов на основе $p-n$ -переходов. Например, на ВАХ кремниевых $p-i-n$ -диодов с короткой базой СВЧ диапазона с достаточно совершенной структурой [5] и на ВАХ кремниевых диодов на основе $p-n$ -переходов с большим количеством глубоких уровней [3] при воздействии высокого уровня СВЧ мощности наблюдалось возникновение участков с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС). Теоретического описания данного эффекта приведено не было.

В настоящей работе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований эффекта возникновения ОДС на вольт-амперных характеристиках СВЧ диодных структур на основе кремниевых $p-n$ -переходов при воздействии на них высокого уровня СВЧ мощности.

Эксперимент

В экспериментах исследовалось влияние высокого уровня СВЧ мощности на вид стационарных ВАХ СВЧ диодов типа 2А604 на основе кремниевых $p-n$ -переходов.

Реализовывалось параллельное включение СВЧ диода в микрополосковую линию передачи с волновым сопротивлением 59 Ом, с согласованной нагрузкой, при этом электрический вектор СВЧ поля в отличие от случая, рассмотренного в [3,4], был ориентирован перпендикулярно плоскости $p-n$ -перехода. Сигнал с частотой 1000 МГц через регулируемый аттенюатор подавался на СВЧ диод. Уровень мощности входного СВЧ сигнала контролировался измерителем мощности. Для уменьшения влияния теплового разогрева диодной структуры при прямых напряжениях смещения ВАХ измерялись с использованием характериографа с частотой развертки 100 Гц.

На рис. 1 приведены экспериментальные ВАХ СВЧ диода для различных значений мощности входного сигнала

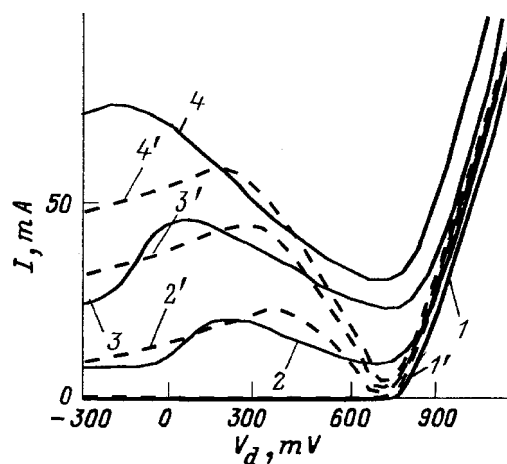


Рис. 1. Экспериментальные ($I-4$) и теоретические ($I'-4'$) вольт-амперные характеристики $I(V_d)$ СВЧ диода для различных значений мощности входного сигнала P_0 , мВт: $1, 1'$ — 0; $2, 2'$ — 150; $3, 3'$ — 350; $4, 4'$ — 500.

P_0 (кривые 1–4). Как следует из результатов эксперимента, при увеличении входной мощности до 150 мВт на ВАХ диодов появляется область ОДС. Величина ОДС с ростом мощности входного сигнала в диапазоне значений от 150 до 500 мВт увеличивается. При уровне мощности входного сигнала 500 мВт отрицательное дифференциальное сопротивление на падающем участке ВАХ достигает значения -20 Ом и в цепи питания диода возникают низкочастотные колебания с частотой $100 \div 200 \text{ кГц}$.

Модель, используемая при расчете

При моделировании поведения СВЧ диода, включенного параллельно в микрополосковую линию передачи, использовалась эквивалентная схема, представленная на рис. 2. Элементы эквивалентной схемы моделируют полупроводниковую структуру диода в виде параллельного соединения нелинейного сопротивления R и емкости C . Корпус диода моделируется элементами L_k и C_k , а микрополосковая линия — входной проводимостью Y_0 в плоскости включения диода.

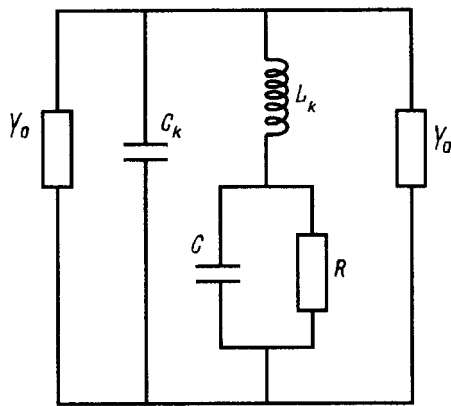


Рис. 2. Эквивалентная схема микрополосковой линии передачи с параллельно включенным СВЧ диодом.

Предполагалось, что сопротивление базы диодной структуры не зависит от величины тока и значительно меньше нелинейного сопротивления R области пространственного заряда до напряжений смещения V , меньших контактной разности потенциалов V_k . При $V > V_k$ величина R считалась постоянной и определялась как $R = \rho l / S$, где ρ , l , S — удельное сопротивление, толщина и площадь базы диодной структуры.

Нелинейное сопротивление R определялось как среднее сопротивление p - n -перехода по первой гармонике СВЧ тока:

$$R = \frac{V_{\sim}}{I_{\sim}}, \quad \text{где} \quad I_{\sim} = \sqrt{A^2 + B^2},$$

$$A = \frac{2}{T} \int_0^T I(V) \sin \omega t dt,$$

$$B = \frac{2}{T} \int_0^T I(V) \cos \omega t dt,$$

$$V = V_0 + V_{\sim} \sin \omega t.$$

Здесь V_0 и V_{\sim} — величина постоянного напряжения и амплитуда переменного напряжения на СВЧ диоде, I — ток через активное сопротивление R , $T = 2\pi/\omega$ — период СВЧ колебаний.

При математическом моделировании протекания тока через диод использовалось выражение для вольт-амперной характеристики, полученное с учетом генерационно-рекомбинационных процессов в области пространственного заряда, проявляющихся в коэффициенте неидеальности n [2], и эффекта разогрева свободных носителей заряда [1],

$$I = \frac{qD_n n_p S}{\sqrt{D_n \tau_n}} \left\{ \exp \left[\frac{qV_k}{nkT_0} \left(\frac{T_n - T_0}{T_n} \right) + \frac{qV}{nkT_n} \right] - 1 \right\} + \frac{qD_p p n S}{\sqrt{D_p \tau_p}} \left\{ \exp \left[\frac{qV_k}{nkT_0} \left(\frac{T_p - T_0}{T_p} \right) + \frac{qV}{nkT_p} \right] - 1 \right\},$$

где D_n , D_p , τ_n , τ_p , T_n , T_p — коэффициенты диффузии, времена жизни и температуры электронов и дырок соответственно, T_0 — температура решетки.

Так как в экспериментах использовался сигнал из низкочастотной части СВЧ диапазона (1000 МГц), при расчетах можно не учитывать эффекты, связанные с конечностью времен релаксации энергии и квазиимпульсы свободных носителей заряда [6,7].

Емкость полупроводниковой структуры (C) определялась суммой барьерной (C_b) и диффузной (C_d) емкостей,

$$C = C_b + C_d.$$

Величины барьерной и диффузной емкостей определялись как средние по первой гармонике СВЧ тока с использованием соотношений [8,9]

$$C_b = S \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 q n p}{2(V_k - V)(n + p)}},$$

$$C_d \approx \tau \frac{dI}{dV},$$

где n и p — концентрации электронов и дырок в n - и p -областях p - n -перехода соответственно; τ — эффективное время жизни неосновных носителей заряда, определяемое в структурах с короткой базой временем диффузии носителей через базу и скоростью рекомбинации носителей на контакте [10]; ε — относительная диэлектрическая проницаемость; ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума; S — площадь структуры; V_k — контактная разность потенциалов.

Расчет вольт-амперной характеристики диода проводился с учетом детекторного эффекта с использованием соотношения $I_c = \int_0^T I(V) dt$. При расчетах учитывалось, что последовательно с СВЧ диодом в цепи питания

было включено постоянное низкоомное сопротивление R_l . Вольт-амперная характеристика $I|V_d|$ определялась из решения уравния

$$V_d = V_0 + I_c R_l.$$

Амплитуда СВЧ напряжения V^{\sim} определялась по величине поглощенной диодом СВЧ мощности P из соотношения

$$P = (V^{\sim})^2 / 2R.$$

Для вычисления величины поглощенной СВЧ мощности использовалось выражение [11]

$$P = P_0 (1 - |N|^2 - |T|^2),$$

где P_0 — падающая на диод СВЧ мощность, $N = -Y/(2Y + Y_0)$ — коэффициент отражения СВЧ сигнала от диода, $T = 2Y_0/(Y + 2Y_0)$ — коэффициент прохождения СВЧ сигнала, $Y = j\omega C_k + [j\omega_k L_k + (j\omega C + 1/R)^{-1}]^{-1}$ — комплексная проводимость диода.

Результаты расчета

Расчеты, выполненные с использованием вышеприведенной модели, показали, что при подаче СВЧ сигнала на диод при отрицательных и небольших положительных напряжениях смещения значительная часть мощности поглощается.

Через $p-n$ -переход проходит ток, обусловленный разогревом носителей заряда и эффектом выпрямления, который создает падение напряжения на последовательно включенном сопротивлении R_l , смещающее $p-n$ -переход в обратном направлении. С ростом прямого

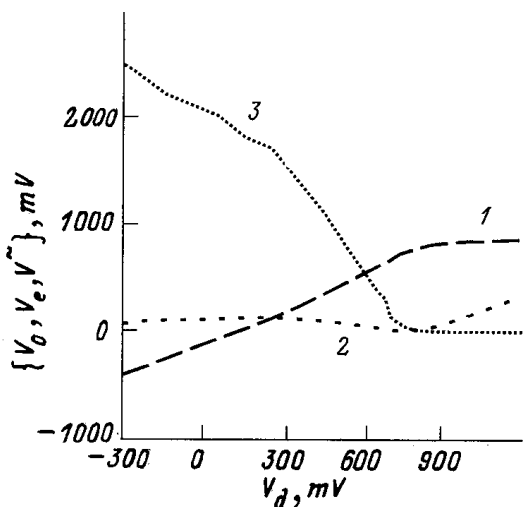


Рис. 3. Зависимости величин постоянного напряжения смещения V_0 (1) и V_l (2) на $p-n$ -переходе и последовательном сопротивлении соответственно, а также амплитуда переменного напряжения V^{\sim} (3) на СВЧ диоде от приложенного напряжения V_d .

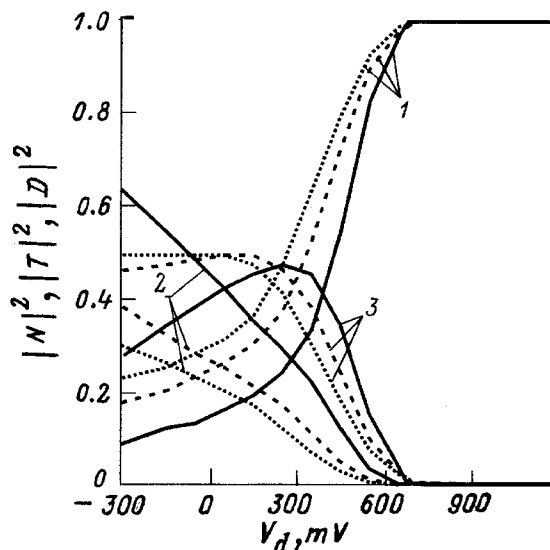


Рис. 4. Зависимости квадратов модулей коэффициентов отражения N (1), прохождения T (2) и поглощения D (3) от величины постоянного смещения V_d для значений падающей СВЧ мощности $P_0 = 100$ (сплошные линии), 300 (штриховые), 500 мВт (точечные).

смещения V_d происходит увеличение смещения V_0 на диоде (рис. 3, кривая 1) при почти постоянном падении напряжения V_l на последовательном сопротивлении R_l (рис. 3, кривая 2).

В этом диапазоне напряжений смещения ток через диод монотонно увеличивается. Его величина определяется током инжекции в условиях разогрева электронного газа СВЧ полем и величиной детектированного сигнала. Отметим, что учет разогрева носителей заряда приводит к уменьшению дополнительной составляющей постоянного тока, обусловленной воздействием СВЧ сигнала, вследствие уменьшения величины детектированного сигнала.

С ростом прямого смещения на диоде V_0 вследствие уменьшения сопротивления диода R и увеличения емкости полупроводниковой структуры C наблюдается существенное увеличение отраженного (рис. 4, кривые 1) и уменьшение прошедшего (рис. 4, кривые 2) и поглощенного (рис. 4, кривые 3) СВЧ сигналов.

Это приводит к уменьшению амплитуды переменного напряжения на диоде (рис. 3, кривая 3). Поэтому наблюдается уменьшение детектированного сигнала и, следовательно, уменьшение постоянного тока, протекающего через $p-n$ -переход, при увеличении постоянного смещения, приложенного к диоду. Таким образом, возникает область отрицательного дифференциального сопротивления (рис. 1, кривые 2'–4').

При больших положительных смещениях величина поглощенной мощности становится незначительной и ВАХ диода принимает вид, какой она имеет в отсутствие СВЧ сигнала.

Заключение

Таким образом, показано, что теоретическое объяснение экспериментально обнаруженного эффекта возникновения отрицательного дифференциального сопротивления на ВАХ диодных структур при воздействии на них высокого уровня СВЧ мощности возможно при учете разогрева носителей заряда и детекторного эффекта.

Список литературы

- [1] А.И. Вейнгер, А.Г. Парицкий, Э.А. Акопян, Н.А. Дадамирзаев. ФТП, **9**, 216 (1975).
- [2] С.Т. Sah, R.N. Noyse, W. Shockley. Proc. IRE, **45**, 1228 (1957).
- [3] Н.А. Аблязимова, А.И. Вейнгер, В.С. Питанов. ФТП, **22**, 2001 (1988).
- [4] Н.А. Аблязимова, А.И. Вейнгер, В.С. Питанов. ФТП, **26**, 1041 (1992).
- [5] В.Г. Виненко, С.В. Красовский, Д.А. Усанов. Электрон. техн., сер. 1, Электроника СВЧ, **4**, 38 (1987).
- [6] К.С. Чэмплин, Д.Б. Армстронг, П.Д. Гандерсон. ТИИЭР, **52**, 720 (1964).
- [7] В. Денис, Ж. Канцлерис, З. Маргунас. В сб.: *Тепловые электроны*, под ред. Ю. Пожелы (Вильнюс, Мокслас, 1983).
- [8] Г.И. Веселов, Е.Н. Егоров, Ю.Н. Алехин и др. В сб.: *Микроэлектронные устройства СВЧ*, под ред. Г.И. Веселова (М., Высш. шк., 1988).
- [9] S. Vasu, S.A. Maas, T. Itoh. IEEE Microwave and Guided Lett., **5**, 293 (1995).
- [10] И.М. Викулин, В.И. Стафеев. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Радио и связь, 1990).
- [11] Дж. Хелзайн. *Пассивные и активные цепи СВЧ* (М., Радио и связь, 1981).

Редактор Л.В. Шаронова

Negative resistance in $p-n$ -transition based structures in a microwave field

D.A. Usanov, A.V. Skripal, N.V. Ugryumova

Saratov State University,
410026 Saratov, Russia

Abstract Results are presented of theoretical and experimental investigations of arising of a negative differential resistance on the current-voltage characteristics of $p-n$ diode structures under high level power microwave radiation. Under theoretical analysis of the influence of the high level microwave power on the shape of current-voltage characteristics, the change of the constant component of the current flowing through $p-n$ -structure due to the heating of free charge carriers and the detector effect was taken into account.

Fax: (845-2) 721496 (Usanov)
E-mail: skripal@scnit.saratov.su