

01;06.2;09

©1995

## ОТРАЖЕНИЕ МОЩНОЙ СВЧ-ВОЛНЫ ОТ ДИОДА С БАРЬЕРОМ ШОТТКИ

*А.А.Беляевский, В.И.Борисов, С.Г.Дмитриев*

Теоретический анализ работы полупроводниковых (п/п) приемно-преобразующих устройств электромагнитного излучения СВЧ-диапазона обычно проводится в приближении малого входного сигнала, что и соответствует рабочим условиям эксплуатации п/п приборов в этих устройствах. В частности, конструкция преобразователя призвана обеспечивать практически полное поглощение падающей волны малой мощности данной частоты  $\omega$  в нелинейном элементе [1]. С ростом мощности излучения вследствие нелинейности вольт-амперной характеристики активного элемента, которым обычно является п/п диод с барьером Шоттки, условия согласования нарушаются, и часть падающей мощности отражается от входа устройства. Анализ зависимости коэффициента отражения  $r(P)$  от величины падающей мощности  $P$  в одномодовом волноводе, которому и будет посвящена настоящая работа, полезен для изучения и прогнозирования процессов деградации п/п приборов [2], для расчета ректенн [3] и представляет самостоятельный научный интерес.

Расчет тока  $I(t)$  через п/п диод будет проведен для простой эквивалентной схемы прямосмещенного (на  $V_0$ ) диода без внешней нагрузки (см. вставку к рис. 1). Здесь

$$I_e(V) = I_s \cdot \left[ \exp\left(\frac{e \cdot V}{kT}\right) - 1 \right]; \quad I_s = S \cdot A^* \cdot T^2 \exp\left(-\frac{e \cdot \Phi_k}{kT}\right);$$

$$I_c(V) = C(V) \cdot \frac{dV}{dt}; \quad C(V) = S \cdot \left[ \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 e \cdot N_d}{2(\Phi_k - V)} \right]^{1/2}; \quad (1)$$

$I_e(V)$  — ток эмиссии через барьер Шоттки, определяющий нелинейное сопротивление  $R(V)$  барьера;  $V$  — напряжение на барьере;  $I_c(V)$  и  $C(V)$  — емкостной ток и дифференциальная емкость обедненного слоя,  $\Phi_k$  — высота барьера Шоттки,  $e$  — элементарный заряд,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура,  $N_d$  — концентрация примесей;  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума и относительная диэлектрическая проницаемость,  $S$  — площадь контакта,

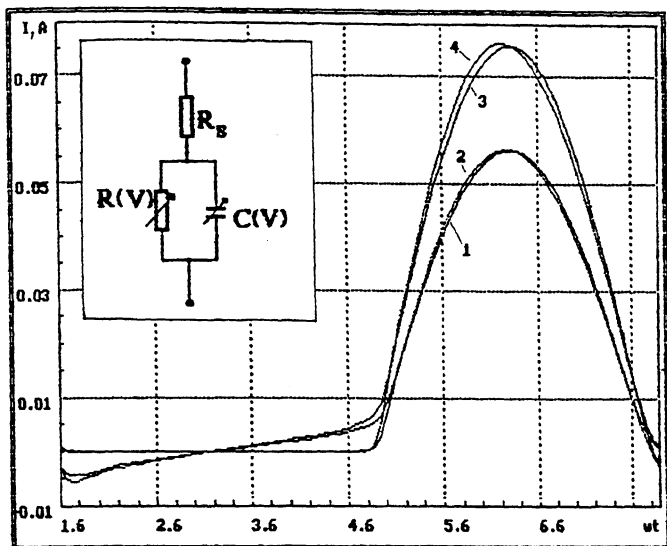


Рис. 1. Временные зависимости тока эмиссии через барьер (1, 3) и полного тока диода (2, 4) при  $T = 293$  К и падающей мощности 25 мВт (1, 2) и 35 мВт (3, 4).

$A^*$  — термоэмиссионная постоянная,  $R_s$  — последовательное омическое сопротивление диода (подробнее см., например, [2,4]).

Мы будем также пренебрегать высшими гармониками СВЧ-напряжения на диоде (которые можно уменьшить конструктивными методами [1]). При указанных предположениях  $V$ , как нетрудно показать, может быть определено из уравнений:

$$U_1 \cos \omega t + V_0 - V = (I_0 + I_c) \cdot R_s,$$

$$P_0 = P(1 - r) = 1/2 U_1^2 \operatorname{Re}(1/z_1), \quad (2)$$

где  $U_1$  — амплитуда первой гармоники напряжения на диоде,  $z_1$  — импеданс диода по первой гармонике,  $P_0$  — поглощаемая в диоде мощность,  $r$  — коэффициент отражения, который обычно определяют в рамках метода эквивалентных схем (с линейным четырехполюсником без потерь, описывающим трансформацию энергии волны в токи диода [5]). Известное выражение для  $r$ :

$$r = \left| \frac{z_H - z_L}{z_H + z_L} \right|^2,$$

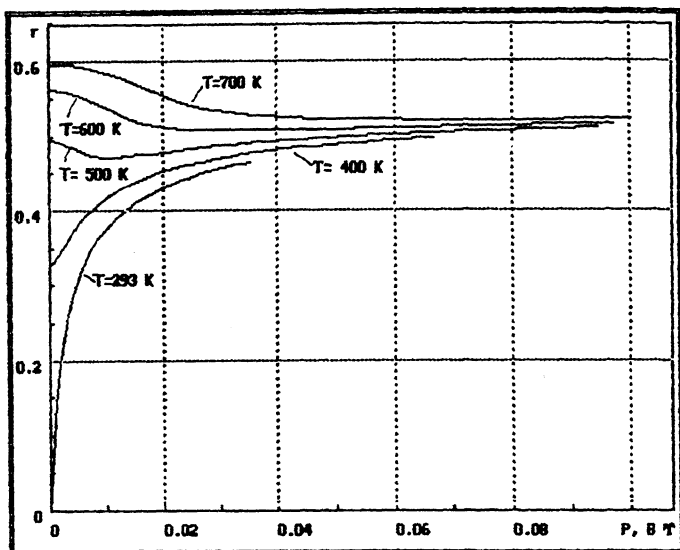


Рис. 2. Зависимости коэффициента отражения от мощности при различных температурах.

где  $z_n$  и  $z_d$  — входной импеданс камеры с диодом и волновое сопротивление подводящего тракта, в данном случае удобно преобразовать к формуле, содержащей зависимость от импеданса диода в явном виде:

$$r = \left| \frac{z_1(\omega) - z_0}{z_1(\omega) + z_0^*} \right|^2, \quad (3)$$

где  $z_0$  — некоторый комплексный параметр (знак \* — означает комплексное сопряжение).

Эта формула может быть получена традиционным путем с помощью матричного описания четырехполюсника. Однако заметив, что коэффициент отражения по напряжению  $\Gamma = U_o/U_n$  (где  $U_n$  и  $U_o$  — комплексные амплитуды падающей и отраженной волн;  $r = |\Gamma|^2$  [5]) является дробно-линейной функцией  $z_1$  (в силу линейности четырехполюсника) и  $|\Gamma| = 1$  для чисто мнимых  $z_1$  в силу закона сохранения энергии, выражение (3) может быть получено путем относительно несложного анализа последнего тождества. При этом, очевидно, величине  $z_0$  можно придать смысл дифференциального малосигнального импедан-

са диода в условиях согласования, когда  $r = 0$ . В таком случае  $z_0$  определяется эквивалентной схемой диода с  $C(V_1)$  и

$$R = \left( \frac{dI_\ominus}{dV} \right)^{-1} \Big|_{V=V_1} = \frac{kT}{e} \cdot \frac{1}{I_s + I_\ominus(V_1)}, \quad (4)$$

где  $V_1$  — постоянное напряжение на барьере.

Далее, импеданс диода  $z_1$  может быть найден по временной зависимости первой гармоники тока  $I_1(t)$ :

$$I_1(t) = U_1(a \cos \omega t + b \sin \omega t),$$

$$z_1 = (a + ib)/(a^2 + b^2), \quad (5)$$

а коэффициенты  $a$  и  $b$  определяются путем разложения  $I(t)$  в ряд Фурье.

Результаты численного расчета зависимостей  $I(t)$ ,  $I_\ominus(t)$  и  $r(P)$  на основе уравнений (1)–(5) для частоты 40 ГГц и типичных для GaAs диодов значений параметров ( $\Phi_k = 0.9$  эВ,  $\epsilon = 13.1$ , диаметр — 4 мкм,  $A^* = 7.8$  А/см<sup>2</sup> · К<sup>2</sup>,  $V_0 = 0.75$  В,  $R_s = 10$  Ом,  $N_d = 10^{17}$  см<sup>-3</sup> [2,4]) приведены на рис. 1, 2. Подробное описание метода расчета довольно громоздко и будет представлено в другом месте.

### Список литературы

- [1] Клич С.М. Проектирование СВЧ-устройств радиолокационных приемников. М.: Сов. радио, 1973. 320 с.
- [2] *Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications* / Ed. by B.L. Sharma. Plenum Press. New York and London. 1974. 369 p.
- [3] Yoo T.-W., Chang K. // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1992. V. MTT-40, N 6. P. 1259–1266.
- [4] Родерик Э.Х. Контакты металл-полупроводник. М.: Радио и связь, 1982. 208 с.
- [5] Сазонов Д.М., Гридин А.Н., Мишустин Б.А. Устройства СВЧ. М.: Высш. шк., 1981. 295 с.

Институт радиотехники  
и электроники АН СССР

Поступило в Редакцию  
10 января 1995 г.