

Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула, О. А. Клименко

**ИМПЕДАНСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИОДА С ТУННЕЛЬНЫМИ И РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНЫМИ ГРАНИЦАМИ**

*Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина  
4, пл. Свободы, Харьков, 61077, Украина  
E-mail: [e.d.prokhorov@mail.ru](mailto:e.d.prokhorov@mail.ru)*

Рассматриваются импедансные характеристики диодов, в которых при определенных напряжениях возникает отрицательная дифференциальная проводимость (ОДП) вследствие туннелирования или резонансного туннелирования электронов через боковые грани диода, которая может быть использована для генерации, усиления, умножения. Определяются зависимости активной и реактивной составляющих импеданса диода с туннельными и резонансно-туннельными границами для реальных параметров диодов. Показано, что предельная частота ОДП диода находится в терагерцевом диапазоне и зависит от его параметров. Ил. 8. Библиогр.: 8 назв.

**Ключевые слова:** отрицательная дифференциальная проводимость, туннельная и резонансно-туннельная границы, диод, туннелирование.

Рассматриваются диоды, в которых при определенных напряжениях между омическими контактами возникает отрицательная дифференциальная проводимость (ОДП) за счет туннелирования или резонансного туннелирования электронов через боковые границы диода, определяются их вольт-амперные характеристики (ВАХ), импедансные характеристики в широком диапазоне частот и их зависимости от параметров структуры. Принципы работы таких диодов описаны в работах [1–3]. Конфигурации диодов довольно сложные, распределения электрических полей и токов в структурах двумерные, что осложняет точное описание, как параметров диодов, так и их ВАХ- и частотных характеристик.

Для оценки частотных характеристик рассматриваемых структур можно воспользоваться представлением структуры в виде эквивалентной схемы с сосредоточенными параметрами.

Диод с туннельной границей  $p^+-n^+$  на канале  $n$ -типа между анодом и катодом (рис. 1). Между анодом и катодом протекает ток  $I_{A-K}$ . Напряжение между катодом и анодом таково, что туннельный  $n^+-p^+$  переход (переход резкий с толщиной  $100 \dots 200 \text{ \AA}$ , в котором туннельная составляющая тока намного больше диффузионно-дрейфовой составляющей) включен в прямом направлении. Суммарный ток через  $n^+-p^+$ -переход –  $I_T$ . При увеличении напряжения на диоде  $U_K$  токи  $I_T$  и  $I_{A-K}$  растут до тех пор, пока ток туннельной границы (ТГ) не достигнет максимального значения. При дальнейшем увеличении напряжения ток ТГ резко уменьшается, что приводит к уменьшению тока между катодом и анодом диода. При последующем увеличении напряжения  $U_K$  ток  $I_T$  возрастает, как и ток  $I_{A-K}$ . Таким образом, диод катод-анод  $n^+-n^+$  с боковыми границами в виде  $n^+-p^+$ -перехода обладает ОДП.

Планарный вариант диода, который выполнен на эпитаксиальной пленке  $n$ -GaAs, выра-

щенный на полуизолирующей подложке, показан на рис. 1.

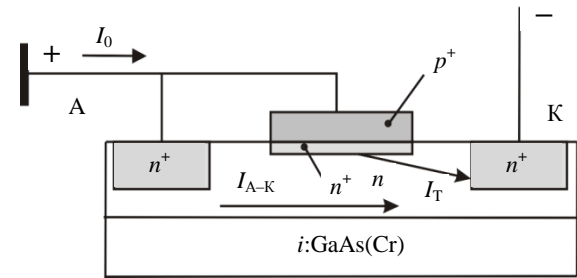


Рис. 1. Планарная структура диода с боковой ТГ  $p^+-n^+$  на эпитаксиальной пленке  $n$ -GaAs, выращенной на полуизолирующей подложке GaAs(Cr)

Приближенная эквивалентная схема такой структуры показана на рис. 2. Здесь  $G$  – ОДП диода,  $C$  – емкость диода,  $R'$  – сопротивление, состоящее из сопротивления  $R_2$  и сопротивления потерь  $R_s$ , включенных последовательно с ТГ,  $R_1$  – сопротивление канала между анодом и катодом, включенное параллельно ТГ.

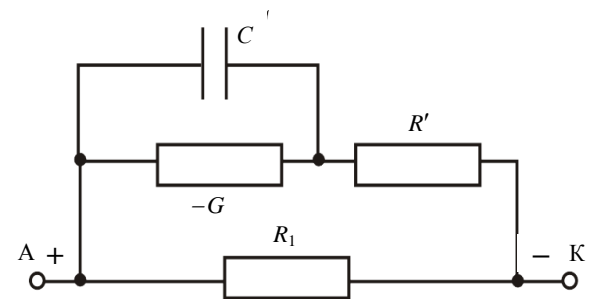


Рис. 2. Эквивалентная схема диода с боковой ТГ  $p^+-n^+$

ВАХ диода на постоянном токе и напряжении следует из эквивалентной схемы рис. 2:

$$U(I) = I \frac{R(I)R_1 + R'R_1}{R(I) + R_1 + R'} \quad (1)$$

где  $R(I)$  – известная зависимость сопротивления ТГ или резонансно-туннельной границы (РТГ) от проходящего тока.

Импеданс такой структуры равен

$$Z = \frac{Z'R_1}{Z' + R_1}; \quad (2)$$

$$Z' = \frac{1}{-G + i\omega C} + R' = \frac{R'G^2 + R'(\omega C)^2 - G - i\omega C}{G^2 + (\omega C)^2}; \quad (3)$$

$$\text{Re } Z = \frac{[R_1R'(G^2 + (\omega C)^2) - GR_1][(R_1 + R')(G^2 + (\omega C)^2) - G] + R_1(\omega C)^2}{[(R_1 + R')(G^2 + (\omega C)^2) - G]^2 + (\omega C)^2}; \quad (4)$$

$$\text{Im } Z = -\frac{R_1^2\omega C(G^2 + (\omega C)^2)}{[(R_1 + R')(G^2 + (\omega C)^2) - G]^2 + (\omega C)^2}. \quad (5)$$

Полученные зависимости активной и реактивной составляющих импеданса позволяют оценить частотные зависимости структуры диода на рис. 1.

В планарной структуре диода (рис. 1) трудно точно определить все сосредоточенные параметры в формулах (1)–(4), можно сделать только приближенные оценки.

Более точные оценки можно сделать в «сэндвич»-структуре на рис. 3, для которой сопротивление, включенное последовательно с боковой границей,  $R_2 > 0$ , и оно может меняться при изменении расстояния между боковой границей и легированной катодной областью. Уменьшить его до нуля нельзя, поскольку сопротивление потерь невозможно сделать нулевым из-за технологии изготовления.

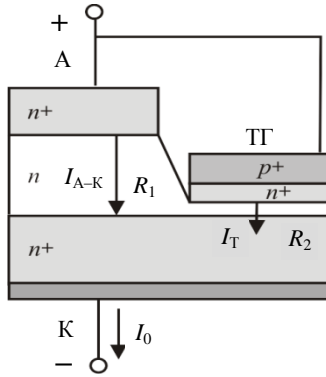


Рис. 3. Структура диода типа «сэндвич» с боковой ТГ  $p^+-n^+$  на эпитаксиальной пленке  $n$ -GaAs, выращенной на сильнолегированной подложке  $n^+$ -GaAs

ВАХ диода запишется в виде

$$I(V) = I(V)_{\text{ТГ}} + V/R_1, \quad (6)$$

где  $R_1 = \frac{l}{S_1 en \mu_n}$  определяется через параметры конкретного материала;  $l$  – расстояние между катодом и анодом;  $R_2 = \frac{l_1}{S_2 en \mu_n}$ ;  $l_1$  – расстояние

между катодом и ТГ; расстояния  $l$  и  $l_1$  можно менять.

Ток ТГ  $I(V)_{\text{ТГ}}$  записан в виде (4)–(6) в работах [1, 4–6].

ВАХ будет зависеть от  $R_2$ : чем меньше  $R_2$ , тем ближе ВАХ к зависимости (4)–(6) в [1, 4–6]. С увеличением  $R_2$  пороговое напряжение возрастает и изменяется ОДП. Принцип построения таких характеристик изложен в работе [8].

Реальная ВАХ ТГ при прямом смещении построена при следующих параметрах: материал GaAs,  $n = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $\mu_n = 7000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ ,  $S_1 = 10^{-6} \text{ см}^2$ ,  $l = 10^{-4} \text{ см}$ ,  $R_1 \approx 10 \text{ Ом}$ ,  $I_{\text{max}} = 0,2 \text{ А}$ ,  $U_{\text{max}} = 0,1 \text{ В}$ ,  $I_S = 10^{-6} \text{ А}$ ,  $b = 0,3$ . Сопротивление  $R_2$  при  $l_1 = 10^{-5} \text{ см}$  и  $S_2 = 10^{-6} \text{ см}^2$  составляет порядка 1 Ом. Емкость  $C = 1 \text{ пФ}$  ( $C = \epsilon\epsilon_0 S/L$ , где  $L$  – толщина ТГ  $\sim 10^{-6} \text{ см}$ ). ОДП, определенная по построенной ВАХ, составляет  $-0,5 \text{ См}$ . В рассматриваемой структуре последовательно с ТГ включено не только сопротивление  $R_S \approx 0,02 \text{ Ом}$ , но и сопротивление  $R_2$  (см. рис. 2, 3).

На рис. 4 показана ВАХ диода с ТГ при  $R_S \approx 0,02 \text{ Ом}$  и при последовательно включенном  $R_2 = 1 \text{ Ом}$ .

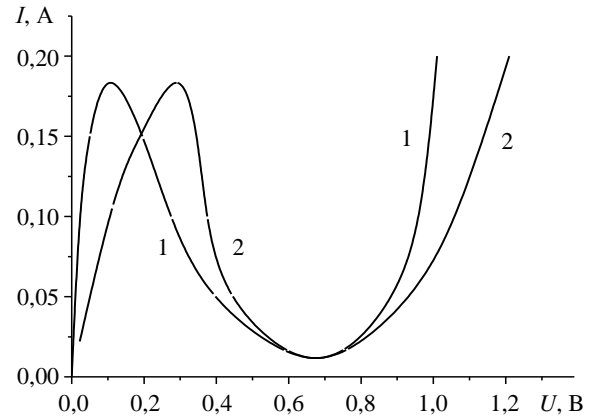


Рис. 4. ВАХ диода с ТГ при  $R_S \approx 0,02 \text{ Ом}$  (1) и при  $R_S + R_2 = 1,02 \text{ Ом}$  (2)

С учетом  $R_2$  и  $R_2 \gg R_S$  активная и реактивная составляющие импеданса структуры будут равны:

$$\text{Re}Z = \frac{[R_1 R_2 (G^2 + (\omega C)^2) - GR_1][R_{12}(G^2 + (\omega C)^2) - G] + R_1 (\omega C)^2}{[R_{12}(G^2 + (\omega C)^2) - G]^2 + (\omega C)^2}; \quad (7)$$

$$\text{Im}Z = -\frac{R_1^2 \omega C (G^2 + (\omega C)^2)}{[R_{12}(G^2 + (\omega C)^2) - G]^2 + (\omega C)^2}, \quad (8)$$

где  $R_{12} = R_1 + R_2$ .

На рис. 5 показаны импедансные характеристики диода с различными сопротивлениями между омическими контактами  $R_1$  и сопротивлением между ТГ и катодом  $R_2$ .

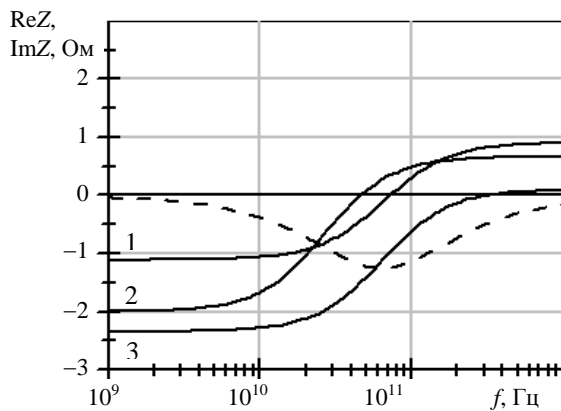


Рис. 5. Импедансные характеристики диода с ТГ, сплошная линия  $\text{Re}Z(f)$ , пунктир  $\text{Im}Z(f)$ : 1 –  $R_1 = 10$  Ом,  $R_2 = 1$  Ом; 2 –  $R_1 = 10$  Ом,  $R_2 = 0,1$  Ом,  $f_{\text{max}} = 260$  ГГц; 3 –  $R_1 = 2$  Ом,  $R_2 = 1$  Ом

Из рассмотрения ВАХ и импедансных характеристик диода с ТГ следует:

- параметры канала анод-катод и туннельной границы существенно влияют на максимальную частоту  $f_{\text{max}}$ , на которой активная составляющая импеданса равна нулю;

- чем меньше сопротивление  $R_2$ , включенное последовательно с ТГ, тем выше частота  $f_{\text{max}}$ . Для рассмотренных параметров микроструктуры ( $S = 10^{-6}$  см<sup>2</sup>) это частоты порядка 300...500 ГГц. Для наноструктур площади на два-три порядка меньше, и  $f_{\text{max}}$  будет находиться в диапазоне нескольких терагерц.

Аналогичные расчеты были проведены для РТГ. Структура в «сэндвич»-варианте с границей  $n^+$ -GaAs-Al<sub>0,2</sub>Ga<sub>0,8</sub>As-GaAs-Al<sub>0,2</sub>Ga<sub>0,8</sub>As- $n^+$ -GaAs показана на рис. 6, где Al<sub>2</sub>GaAs – барьеры, GaAs – квантовая яма на эпитаксиальной пленке  $n$ -GaAs, выращенной на сильнолегированной подложке  $n^+$ -GaAs.

РТГ может быть ближе к катоду, чем анод (аналогично рис. 3). ВАХ диода с РТГ описывается выражением аналогичным (6), а ток РТГ

$I(V)_{\text{РТГ}}$  определяется зависимостью из работ [7, 8].

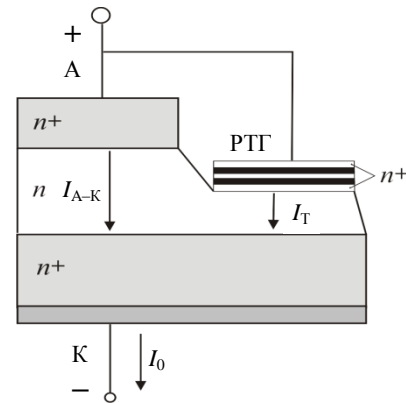


Рис. 6. Структура диода типа «сэндвич» с боковой РТГ  $n^+$ -GaAs-AlGaAs-GaAs-AlGaAs- $n^+$ -GaAs

РТГ состоит из барьеров Al<sub>0,2</sub>Ga<sub>0,8</sub>As/GaAs с высотой 0,25 эВ и одним уровнем в квантовой яме. Материал  $n$ -области GaAs  $n = 10^{16}$  см<sup>-3</sup>,  $\mu_n = 7000$  см<sup>2</sup>/(В·с),  $S_1 = 10^{-6}$  см<sup>2</sup>, при  $l = 10^{-4}$  см,  $R_1 \approx 10$  Ом – такое же, как и в случае ТГ, и может меняться с уменьшением или увеличением длины  $l$ .

Сопротивление  $R_2$  ( $l_1 = 10^{-5}$  см и  $S_2 = 10^{-6}$  см<sup>2</sup>) составляет порядка 1 Ом. Емкость РТГ  $C \leq 1$  пФ ( $C = \epsilon\epsilon_0 S/L$ , где  $L$  – толщина РТГ  $10^{-6}$  см). ВАХ диода с РТГ описывается выражениями, приведенными в работах [7, 8] и в рассматриваемом случае показана на рис. 7.

ОДП, определенная по построенной ВАХ (рис. 7), составляет  $\sim -0,9$  См.

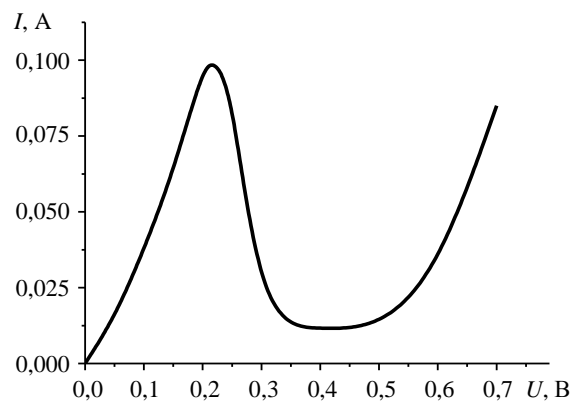


Рис. 7. ВАХ диода с РТГ Al<sub>0,2</sub>Ga<sub>0,8</sub>As/GaAs

Зависимости активной составляющей импеданса от частоты показаны на рис. 8 для диода с РТГ.

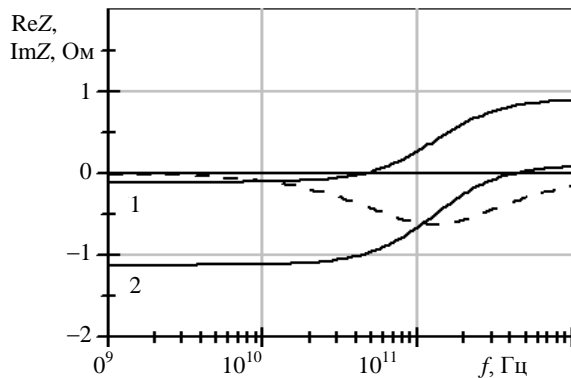


Рис. 8. Импедансные характеристики диода с РТГ, сплошная линия –  $ReZ$ , пунктир –  $ImZ$ : 1 –  $R_1 = 10$  Ом,  $R_2 = 1$  Ом; 2 –  $R_1 = 10$  Ом,  $R_2 = 0,1$  Ом,  $f_{max} = 400$  ГГц

Характеристики примерно такие же, как и для ТГ. Разница обусловлена отличием ОДП  $G$ . Влияние параметров аналогично ТГ.

Следует отметить, что весьма перспективной границей в рассматриваемых диодах является граница  $n^+p^+n$ , представляющая собой триодную структуру, в которой  $n^+p^+$  туннельный переход, включенный в прямом направлении, и  $p^+n$ -переход, включенный в обратном направлении. Эмиттерный туннельный диод имеет участок ОДП на ВАХ, такой же участок ОДП имеет ВАХ коллектора. Такая граница действует аналогично рассмотренным выше, но она имеет преимущество – емкость эмиттерного  $n^+p^+$ -перехода и емкость коллекторного перехода  $p^+n$  включены последовательно, и значит, емкость границы оказывается меньше емкости ТГ и РТГ. Это приведет к более высокочастотному пределу работы такой структуры.

**Выводы.** Диоды с ТГ и РТГ обладают отрицательной активной составляющей импеданса ( $ReZ < 0$ ) в широком диапазоне частот. Частоты, на которых  $ReZ = 0$  для рассмотренных микроструктур ( $S \sim 10^{-6} \text{ см}^2$ ), находятся в диапазоне 300...500 ГГц. При уменьшении структур до наноразмеров предельные частоты, на которых возможна генерация, находятся в терагерцевом диапазоне.

Реактивная составляющая импеданса диодов с ТГ и РТГ носит емкостной характер и имеет максимум на частотах, близких к частотам, на которых  $ReZ = 0$ . При дальнейшем увеличении частоты ( $ReZ > 0$ ) емкостная составляющая импеданса уменьшается.

Импедансные характеристики исследованных диодов дают возможность оценить их частотный диапазон. Более точные значения  $f_{max}$  можно оценить, определяя эффективность генерации диодов на основной частоте и гармониках в широком диапазоне частот, а также исследуя умножение частоты на гармониках.

Диоды с ТГ и РТГ могут быть практически выполнены, кроме арсенида галлия, на германии, кремнии и на других полупроводниках  $A^3B^5$  и их соединениях.

1. Прохоров Э. Д. Отрицательная дифференциальная проводимость полупроводникового диода с туннельными боковыми гранями / Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула // Радиофизика и электрон. – 2010. – 1(15), № 2. – С. 109–113.
2. Prokhorov E. D. Negative differential conductivity semiconductor diode with resonance border / E. D. Prokhorov, O. V. Botsula // Proc. 6 Int. symp. "Physics and engineering of MM and SubMM waves". – Kharkov, 2010. – Sect. D, D-13.
3. Прохоров Э. Д. ОДП диода с туннельными и резонансно-туннельными границами / Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула // Материалы 20 Междунар. Крымской конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, 2010. – Т. 1. – С. 218–219.
4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: в 2 т. Т. 2 / С. Зи. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
5. Esaki L. New Phenomenon in Narrow Germanium  $p-n$  junction / L. Esaki // Phys. Rev. – 1958. – 109. – P. 603–605.
6. Прохоров Э. Д. Твердотельная электроника / Э. Д. Прохоров. – Х.: Харьков. нац. ун-т, 2008. – 544 с.
7. Schulman J. N. Physics-Based RTD current voltage equation / J. N. Schulman, H. J. De Los Santos, D. N. Chow // IEEE Elect. Device Letters. – 1996. – 17, N 5. – P. 220–222.
8. Прохоров Э. Д. Квантово-размерные эффекты в твердотельных сверхвысокочастотных приборах / Э. Д. Прохоров. – Х.: Харьков. нац. ун-т, 2005. – 220 с.

E. D. Prokhorov, O. V. Botsula, O. A. Klimenko

#### IMPEDANCE CHARACTERISTICS OF DIODES WITH TUNNEL AND RESONANCE-TUNNEL BORDERS

The impedance characteristics diodes having negative differential conductivity (NDC) in result of tunneling or resonance tunneling electron across diode lateral are considered. This NDC can be used for generation, amplifier and multiplication. The active and reactive parts of impedance versus frequency for real diode parameters are determined. It is shown that limiting frequency of NDC diode is corresponded to THz range and depends on diode parameters.

**Key words:** negative differential conductivity, tunnel diode, resonant-tunnel border, diode, tunneling.

Е. Д. Прохоров, О. В. Боцула, О. А. Клименко

#### ІМПЕДАНСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДІОДІВ З ТУНЕЛЬНИМИ І РЕЗОНАНСНО-ТУНЕЛЬНИМИ МЕЖАМИ

Розглядаються імпедансні характеристики діодів, у яких при зазначених напругах виникає негативна диференціальна провідність (НДП) внаслідок тунелювання або резонансного тунелювання електронів крізь бокові грані діода, яка може бути використана для генерації, посилення, помноження частоти. Визначено залежності активної та реактивної складових імпеданса діода з тунельними і резонансно-тунельними межами для реальних параметрів діодів. Показано, що гранична частота НДП діода знаходиться в терагерцевому діапазоні і залежить від його параметрів.

**Ключові слова:** негативна диференціальна провідність, тунельна та резонансно-тунельна межі, діод, тунелювання.

Рукопись поступила 28.09.10 г.