

Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула, О. А. Реутина
Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина
4, пл. Свободы, Харьков, 61077, Украина
E-mail: e.d.prokhorov@mail.ru

ИМПЕДАНС И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕНЕРАЦИИ ПЛАНАРНОГО ДИОДА С РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНОЙ ГРАНИЦЕЙ НА ОСНОВЕ GaAs

В настоящее время активно исследуются приборы, которые могут работать в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах. Для освоения данного диапазона используют твердотельные генераторы, работающие на частотах 100...150 ГГц, с последующим умножением с помощью умножителей частоты этих относительно низких частот до необходимого уровня (реально, пока, до 1...2 ТГц). Ранее были предложены полупроводниковые приборы, которые могут применяться как генераторы, усилители. Они представляют собой диоды с отрицательной дифференциальной проводимостью, которая возникает за счет боковых туннельной или резонансно-туннельной границ (РТГ). В данном исследовании рассматриваются электронные процессы в диодах с РТГ на основе GaAs, при условии, что РТГ ограничена по протяженности. Определяются зависимости активной и реактивной составляющих импеданса планарного диода с РТГ для реальных параметров диодов. Показано, что частотные возможности диода с РТГ существенно зависят от местоположения границы и эффективность генерации и частотный диапазон уменьшаются при перемещении РТГ к аноду. Ил. 6. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: отрицательная дифференциальная проводимость, резонансно-туннельная граница, диод, частотный диапазон, эффективность генерации.

Исследуются диоды с отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП), принципы работы которых описаны в работах [1–3]. Конфигурации планарных диодов довольно сложные, распределения электрических полей и токов в структурах двумерные. Это осложняет точное описание как параметров диодов, так и их частотных и вольтамперных характеристик (ВАХ). Цель настоящей работы – оценить частотные возможности планарных диодов с боковой резонансно-туннельной границей (РТГ).

1. Диод и его эквивалентная схема.

Структура диода в планарном варианте показана на рис. 1, а. Диод выполнен на эпитаксиальной пленке n -GaAs с концентрацией $n \sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$, выращенной на полуизолирующей подложке i -GaAs(Cr). Анод и катод представляют собой омические контакты n^+ с концентрацией на порядок выше концентрации n -области. На эпитаксиальной пленке расположена РТГ (двойной барьер с квантовой ямой), протяженность которой меньше расстояния между катодом и анодом (А–К). РТГ представляет собой, например, такую структуру: n^+ -GaAs-Al_{0,2}Ga_{0,8}As-GaAs-Al_{0,2}Ga_{0,8}As- n^+ -GaAs с одним энергетическим уровнем в квантовой яме или структуру n^+ -GaAs-AlAs-GaAs-AlAs- n^+ -GaAs с двумя энергетическими уровнями в квантовой яме [4–7].

Отметим, что в рассматриваемой структуре нет модуляции проводимости А–К вследствие обеднения, обогащения или образования инверсного канала, как в полевых транзисторах с p - n -переходом или изолированным каналом. Параметры областей, составляющих РТГ, выбраны такими, что ВАХ РТГ симметрична (одинакова при разных полярностях приложенного напряжения). Как известно, РТГ обладает участком ОДП.

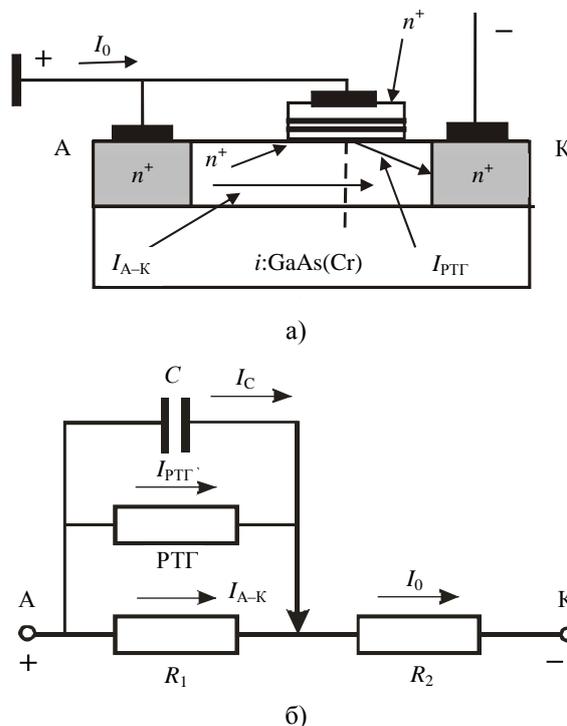


Рис. 1. Планарная структура диода с РТГ на эпитаксиальной пленке n -GaAs, выращенной на полуизолирующей подложке i -GaAs(Cr) (а) и эквивалентная схема диода (б)

Между А–К протекает ток I_{A-K} . При увеличении напряжения на диоде U_0 токи $I_{РТГ}$ и I_{A-K} растут до тех пор, пока ток РТГ не достигнет максимального значения. При дальнейшем увеличении напряжения ток РТГ резко уменьшается, что приводит к уменьшению тока между А–К диода. При последующем увеличении напряжения U_0 ток $I_{РТГ}$ возрастает. Таким образом, диод А–К n^+ - n - n^+ с боковыми границами в виде РТГ обладает ОДП.

Для оценки характеристик рассматриваемых структур можно воспользоваться представлением структуры в виде эквивалентной схемы с сосредоточенными параметрами (рис. 1, б).

Схема упрощенная, но позволяющая оценить основные соотношения между напряжениями и токами в планарной структуре. Упрощение заключается в том, что РТГ с параметрами такими же, как в «сэндвич»-варианте [3], подключается в сечение канала, показанное пунктиром на рис. 1, а (двумерная задача переходит в одномерную). В отличие от «сэндвич»-варианта, ток канала и ток РТГ протекают через общую часть канала R_2 , РТГ может быть соединена с любой точкой на длине канала (пунктир на рис. 1) и сопротивление канала R_2 от этой точки до катода I_2 может меняться в диапазоне 0,5...10 Ом.

Эквивалентная схема структуры представляет собой проводимость РТГ, параллельно которой включена емкость РТГ – C и часть канала R_1 . Последовательно с ними включена часть канала R_2 между РТГ и катодом. Емкость A – K намного меньше емкости РТГ. С увеличением частоты существенную роль будет играть емкостное сопротивление $Z_C = 1/\omega C$, которое включено параллельно активной проводимости РТГ. Индуктивность, включенная последовательно с РТГ (в реальности это золотая полоска с длиной порядка 1 мкм, шириной порядка нескольких мкм и толщиной 3...5 нм), мала и составляет порядка 10^{-15} Гн. Резонанс индуктивность–емкость находится на частотах, превышающих диапазон рабочих частот данного прибора, и здесь он не рассматривается.

2. ВАХ. Ток РТГ $I_{РТГ}(U)$ состоит из резонансно-туннельного тока и надбарьерного тока (выражения для них приведены в работах [3, 4]):

$$I_{РТГ}(U) = I_1(U) + I_2(U), \quad (1)$$

где $I_1(U)$ – резонансно-туннельный ток; $I_2(U)$ – надбарьерный ток термоэлектронной эмиссии.

Зависимость электронного тока через структуру I_0 от напряжения на структуре U_0 запишем в виде

$$I_0(U_0) = \frac{U_0 - I_{РТГ}R_2}{R_1} + I_{РТГ}(U_0 - I_{РТГ}R_2) + (U_0 - I_{РТГ}R_2) \frac{1}{Z_C}. \quad (2)$$

Решая трансцендентное уравнение (2), находим ВАХ структуры в планарном варианте при R_1 и R_2 , которые не зависят от напряжения.

Материалом канала могут быть Ge, Si, GaAs и другие полупроводники, которые обладают нелинейной зависимостью скорость–поле $v(E)$,

поэтому и сопротивления канала будут зависеть от поля в канале. Во всем канале на основе GaAs дрейфовая скорость электронов имеет вид [7, 8]

$$v(U/l) = \frac{\mu_n(U/l) + v_s(U/U_p)^4}{1 + (U/U_p)^4}, \quad (3)$$

где v_s – дрейфовая скорость насыщения в GaAs ($\sim 10^7$ см/с); U_p – пороговое напряжение.

В части канала R_1 напряженности невелики ($E < E_{пор}$), а в части канала R_2 напряженности могут быть выше пороговой, и здесь необходимо учитывать зависимости $v(E)$. На частотах, где сказывается инерционность перераспределения электронов между долинами зоны проводимости GaAs, следует использовать динамические зависимости $v(E)$, получаемые методом Монте-Карло [8].

Трансцендентное уравнение для тока через диод с учетом зависимостей $v(E)$ имеет вид

$$I_0(U_0) = (U_0 - I_{РТГ}R_2(v(E))) / R_1(v(E)) + I_{РТГ}(U_0 - I_{РТГ}R_2(v(E))) + \frac{U_0 - I_{РТГ}R_2(v(E))}{Z_C}. \quad (4)$$

Таким образом, определяются ВАХ планарного диода с РТГ при изменении места подключения РТГ (различном соотношении сопротивлений канала).

По ВАХ определяются максимальная величина ОДП ($-G$), зависимость импеданса от частоты и эффективность генерации.

3. Импеданс и энергетические характеристики. Импеданс планарного диода с РТГ на основе эквивалентной схемы рис. 1 равен

$$Z = R_2 + \frac{1}{1/R_1 - G + j\omega C}; \quad (5)$$

$$\text{Re } Z =$$

$$= \frac{R_2(1 - GR_1)^2 + (\omega C)^2 R_1^2 R_2 + R_1(1 - GR_1)}{(1 - GR_1)^2 + (\omega C)^2 R_1^2}; \quad (6)$$

$$\text{Im } Z = - \frac{\omega C R_1^2}{(1 - GR_1)^2 + (\omega C)^2 R_1^2}. \quad (7)$$

Полученные зависимости активной и реактивной составляющих импеданса от частоты позволяют оценить частотные возможности планарной структуры диода в зависимости от положения РТГ по отношению к катоду и аноду.

Оценивалась эффективность генерации в зависимости от параметров диода с РТГ. В режиме генерации в одноконтурном резонаторе на диоде действует напряжение $U(t) = U_0 + U_1 \sin \omega t$ при соотношении амплитуд $U_0 - U_1 > 0,5U_{\max}$. Рабочая точка в течение периода колебаний пе-

ремещается по зависимости $I_0(U_0)$. Ток через диод разлагается в ряд Фурье. Для определения эффективности генерации, например, на 1-й гармонике необходимо определить постоянную составляющую тока и амплитуду 1-й гармоники:

$$I(U_0) = \frac{1}{T} \int_0^T I(U(t)) dt; \quad (8)$$

$$I_1 = \frac{2}{T} \int_0^T I(U(t)) \sin \omega t dt. \quad (9)$$

Для получения максимального значения эффективности генерации для задаваемого поля U_0 амплитуда 1-й гармоники U_1 оптимизируется: находим такую амплитуду 1-й гармоники, при которой КПД максимален и определяется в виде

$$\text{КПД} = \frac{1}{2} \frac{I_1(U_1)}{I(U_0)U_0} \times 100\%. \quad (10)$$

Таким образом определяется максимальная эффективность генерации на конкретной частоте.

4. Результаты численных расчетов.

В качестве границы взята одноуровневая РТГ $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}/\text{GaAs}$. Ширина квантовой ямы составляла $a = 6$ нм, ширина одинаковых барьеров $b_1 = b_2 = b \approx 1,5$ нм, высота барьеров $0,3$ эВ, концентрация в прилегающих к барьерам областях n^+ порядка 10^{19} см^{-3} . В области А-К материал GaAs, $n = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $\mu_n = 7000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, $S_1 = S_2 = 10^{-6} \text{ см}^2$, $l = l_1 + l_2 = 10^{-4} \text{ см}$, $R_1 + R_2 \approx 10 \text{ Ом}$, $I_s = 10^{-6} \text{ А}$, $b = 0,3$. Емкость одноуровневой РТГ определена ранее [3, 7] и составляет $C = 0,8 \text{ пФ}$ ($C = \epsilon_0 S / L$, где L – толщина РТГ $\sim 10^{-6} \text{ см}$). Параметры диода такие же, как и в работе [2] для варианта А.

Из анализа ВАХ диода следует, что из-за смещения РТГ к аноду происходит:

- увеличение напряжения U_{\max} соответствующего I_{\max} ,
- увеличение напряжения U_{\min} соответствующего I_{\min} ,
- уменьшение I_{\max} и увеличение I_{\min} ,
- изменение максимальной ОДП ($-G$),
- с увеличением частоты I_{\max} и I_{\min} сближаются, что приводит к изменению ОДП.

Зависимости на рис. 2 показывают, как зависит активная составляющая импеданса от параметров диода, в частности, от местоположения РТГ при независимых от напряжения сопротивлениях канала. Для емкости $0,8 \text{ пФ}$ область отрицательной составляющей импеданса для параметров А простирается от 360 ГГц (рис. 2, кривая 1) до $65 \dots 70 \text{ ГГц}$ (рис. 2, кривая 3). В этих расчетах принято, что сопротивления канала практически не зависят от приложенного к каналу напряжения.

Еще одна важная особенность планарного диода с РТГ – местоположение РТГ по отношению к катоду или аноду. На рис. 3 показано, как меняется область отрицательной активной составляющей импеданса для параметров А при изменении места подключения РТГ. Оказывается, что чем дальше от катода подключена РТГ, тем меньше область отрицательной активной составляющей импеданса и максимальная частота, на которой $\text{Re}Z$ стремится к нулю. Это ограничивает частотные возможности планарного диода с РТГ по сравнению с «сэндвич»-вариантом диода.

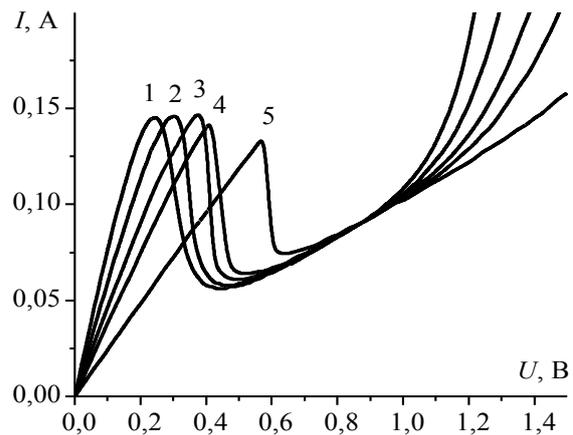


Рис. 2. ВАХ планарного диода с одноуровневой РТГ $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}/\text{GaAs}$ на частоте 10 ГГц : 1 – $R_1 = 9,9 \text{ Ом}$, $R_2 = 0,1 \text{ Ом}$; 2 – $R_1 = 9,5 \text{ Ом}$, $R_2 = 0,5 \text{ Ом}$; 3 – $R_1 = 9 \text{ Ом}$, $R_2 = 1 \text{ Ом}$; 4 – $R_1 = 8,5 \text{ Ом}$, $R_2 = 1,5 \text{ Ом}$; 5 – $R_1 = 7 \text{ Ом}$, $R_2 = 3 \text{ Ом}$

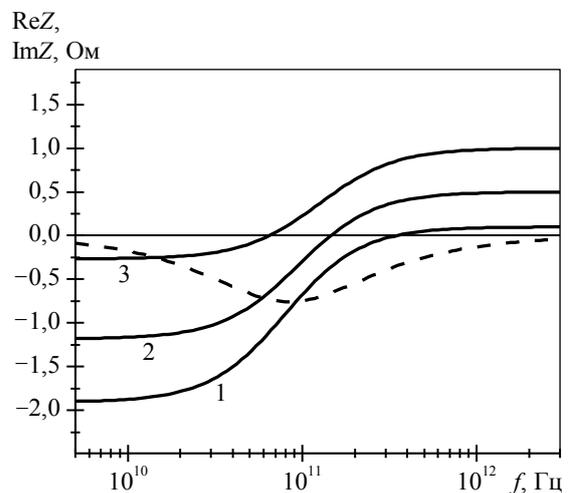


Рис. 3. Импедансные характеристики диода с РТГ $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}/\text{GaAs}$, сплошная линия $\text{Re}Z(f)$, пунктир $\text{Im}Z(f)$. 1 – $R_1 = 9,9 \text{ Ом}$, $R_2 = 0,1 \text{ Ом}$, $G = -0,6 \text{ См}$; 2 – $R_1 = 9,5 \text{ Ом}$, $R_2 = 0,5 \text{ Ом}$, $G = -0,7 \text{ См}$; 3 – $R_1 = 9 \text{ Ом}$, $R_2 = 1 \text{ Ом}$, $G = -0,9 \text{ См}$

Сопротивления R_1 и R_2 между А-К, как показано выше, зависят от приложенной напряженности электрического поля и с увеличением напряженности увеличиваются. Это приводит к изменению ВАХ диода с РТГ при тех же параметрах диода (рис. 4). По сравнению с предыду-

шим случаем (сопротивления не зависят от напряжения), ВАХ имеют меньшие I_{\min} при больших U_{\min} . Кроме того, несколько изменяются импедансные характеристики: максимальная частота, на которой $\text{Re}Z \rightarrow 0$, уменьшается. В то же время при удалении РТГ от катода максимальные частоты, на которых $\text{Re}Z \rightarrow 0$, практически одинаковы в сравнении со случаем постоянных сопротивлений.

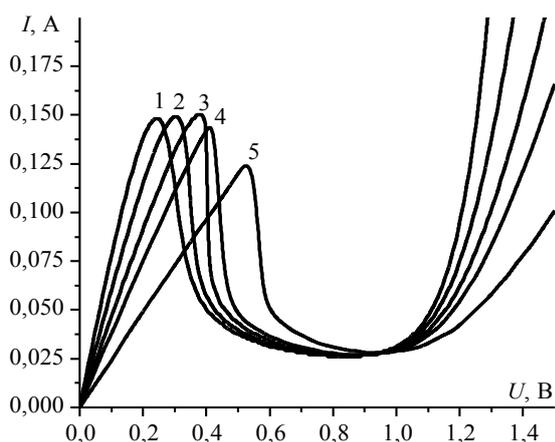


Рис. 4. ВАХ диода с РТГ $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As} / \text{GaAs}$ на частоте 10 ГГц при $R=f(U)$: 1 – $l_2 \approx 0,01l_1$; 2 – $l_2 \approx 0,05l_1$; 3 – $l_2 \approx 0,1l_1$; 4 – $l_2 \approx 0,15l_1$; 5 – $l_2 \approx 0,3l_1$

Учет изменения сопротивлений канала при приложенных напряженностях электрического поля сдвигает максимальные частоты генерации в сторону больших частот (рис. 3, 5). Сопротивления канала определялись по зависимостям тока через сопротивления в точках максимальной проводимости, которая принималась в расчетах.

Следует также отметить, что при учете зависимостей сопротивлений канала от напряжения значения $\text{Re}Z$ становятся больше по сравнению со случаем постоянных сопротивлений. Это обусловлено тем, что отношение максимум/минимум на ВАХ структуры при низких частотах больше по сравнению с независимыми от напряжения сопротивлениями.

Более точные значения частотных диапазонов, в которых диоды с РТГ в планарном варианте могут генерировать, можно получить, определяя эффективность генерации по зависящим от частоты ВАХ диодов. Полученные результаты могут служить ориентиром при двумерном рассмотрении работы планарного диода с РТГ.

Зависимости эффективности генерации от местоположения РТГ и частоты показаны на рис. 6, из которого видно, что:

- перемещение РТГ к аноду приводит к уменьшению эффективности генерации в 2–10 раз;
- зависящее от напряжения сопротивление канала А–К улучшает эффективность генерации диода с РТГ.

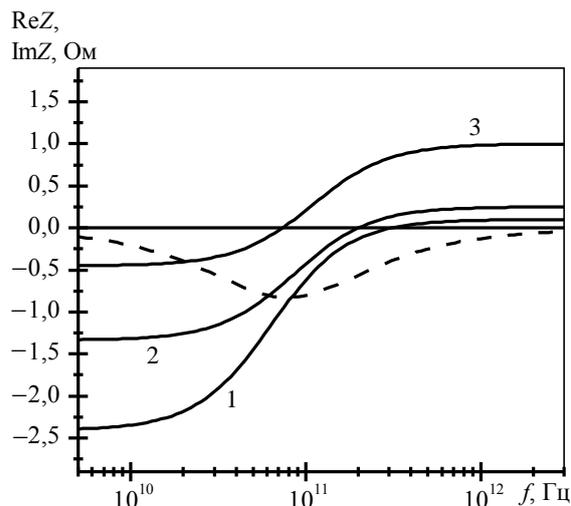


Рис. 5. Импедансные характеристики диода с РТГ $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As} / \text{GaAs}$ при $R=f(U)$, сплошная линия – $\text{Re}(f)$, пунктир – $\text{Im}(f)$. 1 – $l_2 \approx 0,01l_1$, $G = 0,55 \text{ См}$; 2 – $l_2 \approx 0,05l_1$; $G = 0,65 \text{ См}$; 3 – $l_2 \approx 0,1l_1$, $G = 0,8 \text{ См}$

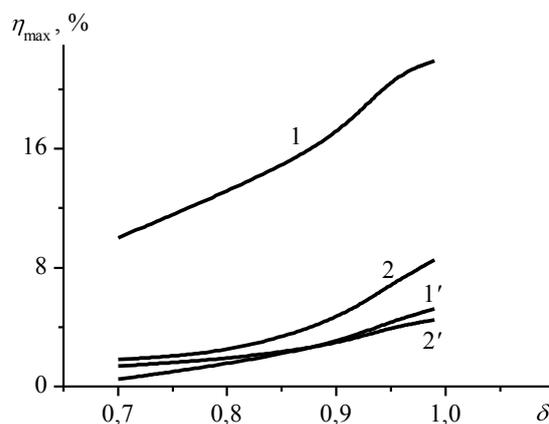


Рис. 6. Максимальные значения КПД в зависимости от точки подключения РТГ: 1 – $R(U)$, 10 ГГц; 2 – $R = \text{const}$, 10 ГГц; 1' – $R(U)$, 40 ГГц; 2' – $R = \text{const}$, 40 ГГц

Это является ориентиром при проектировании рассматриваемых диодов для миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов.

Выводы. Диоды с РТГ в планарном варианте обладают отрицательной активной составляющей импеданса ($\text{Re}Z < 0$) в широком диапазоне частот. Частоты, на которых $\text{Re}Z \rightarrow 0$ для рассмотренных микроструктур ($S \sim 10^{-6} \text{ см}^2$), находятся в диапазоне до 100...300 ГГц. При уменьшении структур до наноразмеров предельные частоты, на которых возможна генерация, будут находиться в терагерцевом диапазоне.

Реактивная составляющая импеданса диодов с РТГ в планарном варианте носит емкостной характер и имеет максимум на частотах, близких к частотам, на которых $\text{Re}Z \rightarrow 0$.

Чем дальше от катода подключена РТГ в планарном диоде, тем меньше область отрицательной активной составляющей импеданса по

частоте. Это ограничивает частотные возможности планарного диода с РТГ по сравнению с «сэндвич»-вариантом диода.

Более точные значения f_{\max} можно получить, определяя эффективность генерации планарных диодов с РТГ на основной частоте и гармониках в широком диапазоне частот, а также исследуя умножение частоты на гармониках.

Проведенные расчеты показывают, что диоды с РТГ обладают большими частотами генерации по сравнению с диодами с туннельной границей в планарном варианте [9].

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

Библиографический список

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. Прохоров Э. Д. Генерация и умножение частоты диодами с туннельными границами на основе GaAs / Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула, О. А. Клименко // Радиофизика и электрон. – 2011. – 2(16), № 3. – С. 91–96.
3. Эффективность генерации диодов с резонансно-туннельными границами в «сэндвич»-варианте / Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула, О. А. Клименко, И. П. Сторо-женко // Радиофизика и электрон. – 2012. – 3(17), № 3. – С. 72–78.
4. Schulman J. N. Physics-Based RTD current voltage equation / J. N. Schulman, H. J. De Los Santos, D. N. Chow // IEEE Elect. Device Lett. – 1996. – 17, N 5. – P. 220–222.
5. Waho T. Novel vultiple-valued logic gate usind resonant tunneling devices / T. Waho, K. J. Chen, M. Yamamoto // IEEE Transaction of electron devices letters. – 1996. – 17, N 5. – P. 223–225.
6. Shifren L. C. A wigner function-based quantum ensemble monte-carlo study of a Resonant Tunneling diode / L. C. Shifren, D. K. Ferry // IEEE Transaction of electron device. – 2003. – 50, N 3. – P. 769–773.
7. Roger Lake. A physics based model for the RTD quantum capacitance / Roger Lake, Junyie Yang // IEEE Transaction of electron devices. – 2003. – 50, N 3. – P. 785–789.
8. Иващенко В. М. Моделирование кинетических явлений в полупроводниках. Метод Монте-Карло / В. М. Иващенко, В. В. Митин. – К.: Наук. думка, 1990. – 225 с.
9. Прохоров Э. Д. Импедансные характеристики планарного диода с туннельной границей на основе GaAs / Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула, О. А. Клименко // Вісник Харків. нац. ун-ту. – 2011. – 18, № 966. – С. 13–18.

Рукопись поступила 04.10.2012 г.

E. D. Prohorov, O. V. Botsula, O. A. Reutyna

IMPEDANCE AND GENERATION EFFICIENCY OF PLANAR DIODE WITH RESONANT TUNNELING BOUNDARY BASED ON GaAs

Currently, the devices that can operate in the millimeter and submillimeter ranges are actively investigated. For the development of this range solid-state generators are used, operating at frequencies of 100...150 GHz, with further multiplication by frequency multipliers of these relatively low frequencies up to the required level (in fact, so far to 1...2 THz). Semiconductor devices that can be used as oscillators and amplifiers have been proposed previously. It is a diode with a negative differential conductivity, which is due to the lateral tunnel or resonant-tunneling boundaries. In this study electronic processes in diodes with a resonant tunneling boundary based on GaAs are considered, provided that the resonant tunneling is limited by the length of the boundary. Dependences of the active and reactive components of the impedance of a planar diode with resonant tunneling boundaries for the real diode parameters are determined. It is shown that the frequency possibilities of the diode with resonant tunneling boundaries depend strongly on the location of the boundary. It is shown that the efficiency of generation and the frequency range are reduced by moving the resonant-tunneling boundary to the anode.

Key words: negative differential conductivity, resonant tunneling boundary, diode, frequency range, generation efficiency.

Е. Д. Прохоров, О. В. Боцула, О. О. Реутіна

ІМПЕДАНС ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ГЕНЕРАЦІЇ ПЛАНАРНОГО ДІОДА З РЕЗОНАНСНО-ТУНЕЛЬНОЇ МЕЖЕЮ НА ОСНОВІ GaAs

На сьогодні досліджуються прилади, які можуть працювати в міліметровому і субміліметровому діапазонах. Для освоєння цього діапазону використовують твердотільні генератори, що працюють на частотах 100...150 ГГц, з подальшим множенням за допомогою помножувачів частоти цих відносно низьких частот до необхідного рівня (реально до 1...2 ТГц). Раніше було запропоновано напівпровідникові прилади, які можуть застосовуватися як генератори, підсилювачі. Вони являють собою діоди з негативною диференціальною провідністю, що виникає за рахунок бічних тунельної або резонансно-тунельної меж (РТМ). У даному дослідженні розглядаються електронні процеси в діодах з РТМ на основі GaAs, за умови, що РТМ обмежена по протяжності. Визначаються залежності активної і реактивної складових імпедансу планарного діоду з РТМ для реальних параметрів діодів. Показано, що частотні можливості діоду з РТМ істотно залежать від місця розташування межі і ефективність генерації та частотний діапазон зменшуються при переміщенні РТМ до аноду.

Ключові слова: негативна диференціальна провідність, резонансно-тунельна межа, діод, частотний діапазон, ефективність генерації.