

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

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕНЕРАЦИИ ПЛАНАРНОГО ДИОДА
 С ТУННЕЛЬНЫМ АНОДОМ И ТУННЕЛЬНОЙ БОКОВОЙ ГРАНИЦЕЙ**

Освоение миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов является одной из актуальных задач радиофизики. Однако на сегодняшний день набор активных элементов, способных работать в указанных диапазонах, ограничен. Одним из вариантов такого активного элемента есть предлагаемый прибор – диод с туннельной боковой границей (ТБГ) и туннельным анодом (ТА). В работе исследуются вольтамперные характеристики и эффективность генерации планарных диодов с ТА и ТБГ на основе GaAs с целью определения влияния параметров ТА и ТБГ на вольтамперные характеристики и эффективность генерации на низких и высоких частотах, а также оценки частотного предела работы диодов. Исследование показало возможность генерации диодами с ТА и ТБГ в диапазоне десятки-сотни гигагерц и возможность существования двух участков отрицательной дифференциальной проводимости двух зон генерации по напряжению. Результаты исследования позволили определить основные свойства предложенных диодных структур и являются ориентиром для дальнейшего детального анализа физических процессов в них и практической реализации. Ил. 5. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: GaAs-диоды, туннельная граница, туннельный анод, вольтамперные характеристики, эффективность генерации, диапазон частот.

В работах [1–4] изложены принципы работы полупроводниковых приборов с туннельной границей (ТГ) и резонансно-туннельными границами (РТГ), обладающих отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП), которые могут быть использованы для генерации и умножения частоты в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах; исследованы энергетические и частотные характеристики диодов с ТГ и РТГ в «сэндвич»-структуре и в планарном варианте.

Цель настоящей работы – исследование энергетических и частотных характеристик диодов с ТГ и туннельным анодом (ТА), которые могут отличаться от характеристик диодов с ТГ и РТГ.

1. Структура диода 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 полупроводящей подложке i -GaAs(Cr). Катод представляет собой омический контакт n^+ с концентрацией, на порядок выше концентрации в n -области, а анод – $p^+ - n^+$ -переход на вырожденных полупроводниках GaAs (концентрация в областях $5 \cdot 10^{18} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$, переход резкий с толщиной $100 \dots 150 \text{ \AA}$), вольтамперная характеристика (ВАХ) имеет участок отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП). Боковая туннельная граница представляет собой такой же $p^+ - n^+$ -переход на основе вырожденных полупроводников GaAs и с ВАХ такой же как на аноде. Отличие туннельного анодного контакта от туннельного контакта боковой границы (ТБГ) может заключаться в площади контактов. Таким образом, ток через канал анод–катод (А–К) определяется туннельным током анодного контакта и туннельным током боковой ТГ.

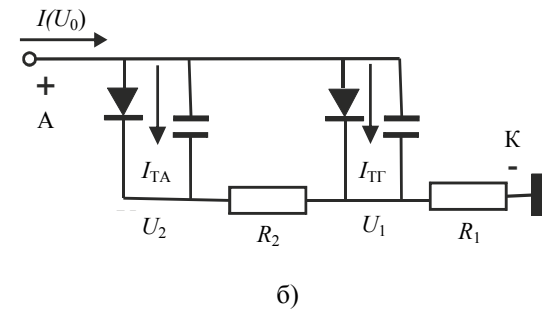
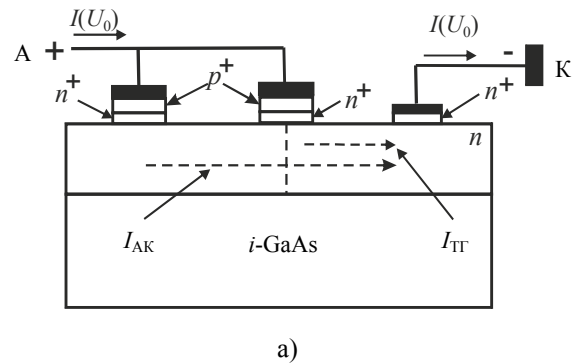


Рис. 1. Структура с ТА и ТГ (а) и ее эквивалентная схема (б), отражающая токи проводимости ТА, ТГ и емкостные токи

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 затвором.

Между анодом и катодом протекает ток. При отключенной боковой границе ток проводимости определяется туннельным диодом на аноде.

Ток проводимости туннельного диода на аноде $I_{ТА}(U)$ может быть записан точно [5, 6] или в виде следующей аппроксимации [7, 8]:

$$I_{TA}(U) = I_{\max} \frac{U}{U_{\max}} \exp\left(1 - \frac{U}{U_{\max}}\right) + I_{\min} \exp\left(A(U - U_{\min}) + I_S \exp\left(b \frac{eU}{kT} - 1\right)\right), \quad (1)$$

где U – приложенное к туннельному диоду напряжение; I_{\max} – максимальный туннельный ток через диод при напряжении U_{\max} ; I_{\min} – минимальный ток через диод при напряжении U_{\min} ; A – постоянная, характерная для конкретного полупроводникового материала; b – показатель роста диффузионного тока через переход; I_S – ток насыщения туннельного перехода без учета туннелирования. Ток проводимости туннельной границы $I_{TG}(U)$ определяется таким же выражением, как и для туннельного тока проводимости на аноде (1). При одинаковых параметрах областей и площадей эти токи равны.

При увеличении напряжения на диоде U_0 токи I_{TA} и I_{TG} растут до тех пор, пока ток ТГ, которая ближе к катоду, не достигнет максимального значения. При дальнейшем увеличении напряжения ток I_{TG} у катода резко уменьшается, что приводит к уменьшению тока между анодом и катодом диода. При последующем увеличении напряжения U_0 ток I_{TG} возрастает, при этом ток I_{TA} также возрастает и при определенном напряжении достигает максимума, после этого ток I_{TA} резко уменьшается. Таким образом, сначала образуется ОДП за счет ТГ, а затем при увеличении напряжения на структуре образуется второй участок ОДП за счет ТА.

Таким образом, диод $p^{++} - n^+ - n - n^+$ с ТА и боковыми ТГ обладает двумя участками ОДП на ВАХ разнесенными по напряжению.

Для оценки характеристик рассматриваемых структур можно воспользоваться представлением структуры в виде эквивалентной схемы с сосредоточенными параметрами (рис. 1, б). Схема упрощенная, но она позволяет оценить основные соотношения между напряжениями и токами в планарной структуре. Упрощение заключается в том, что ТГ подключается в сечение канала, показанное пунктиром на рис. 1, а (двумерная задача переходит в одномерную).

Ток канала, определяемый током I_{TA} , и ток I_{TG} протекают через общую часть канала с сопротивлением R_1 , ТГ может быть соединена с любой точкой на длине канала (пунктир на рис. 1) и сопротивление R_1 от этой точки до катода может меняться в широких пределах (все зависит от параметров структуры). В исследуемой структуре могут быть рассмотрены следующие варианты:

- ТА является ТБГ,
- ТА является РТГ,
- РТА является РТБГ,
- РТА является ТБГ.

В перечисленных выше структурах отличительной особенностью является наличие двух зон генерации по напряжению, которые образуются благодаря двум участкам ОДП на ВАХ этих структур, возникающие благодаря ОДП РТГ или ТГ. Ниже рассматривается первый вариант структуры.

Эквивалентная схема структуры показана на рис. 1, б. ТА и ТБГ представляют собой активные проводимости параллельно которым включены емкости C (если параметры анода и боковой границы одинаковы) или при разных параметрах соответствующие емкости C_1 и C_2 . Последовательно с анодом включена часть канала с сопротивлением R_2 . С увеличением частоты существенную роль будет играть емкостное сопротивление $Z_C = 1/\omega C$, которое включено параллельно активной проводимости туннельного диода на аноде и туннельного диода боковой границы. Индуктивность, включенная последовательно с ТГ (в реальности это золотая полоска с длиной порядка 1 мкм, шириной порядка нескольких микрометров и толщиной 3–5 мкм), 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. Методика расчета. Из эквивалентной схемы (рис. 1, б) методом узловых напряжений находим ток всей структуры:

$$I(U_0) = I_{TG}(U_1) + I_{CTG} + I_{TA}(U_2) + I_{CTA}(U_2), \quad (2)$$

где I_{TG} и I_C – ток проводимости и емкостной ток ТГ и ТА.

Из уравнения (2) находили падения напряжения U_1 и U_2 на каждом узле и токи:

$$U_1 = U_0 - (I_{TG} + I_{TA})R_1; \quad (3)$$

$$I_{TG}(U_1) = I_{TG}(U_0 - (I_{TA} + I_{TG})R_1); \quad (4)$$

$$U_2 = U_0 - (I_{TA} + I_{TG})R_1 - I_{TA}(U_0 - (I_{TA} + I_{TG})R_1)R_2; \quad (5)$$

$$I_{TA}(U_2) = I_{TA}(U_0 - (I_{TA} + I_{TG})R_1 - I_{TA}R_2). \quad (6)$$

Сопротивления R_1 и R_2 меняются в зависимости от места подключений границы при $R_1 + R_2 = \text{const}$ и концентрации электронов в канале. Емкостные токи определялись по формулам

$$I_{CTG}(U_1) = (U_0 - (I_{TG} + I_{TA})R_1)Z_{CTG}^{-1}. \quad (7)$$

Аналогично определяется $I_{CTA}(U_2)$:

$$I_{CTA}(U_2) = (U_0 - (I_{TG} + I_{TA})R_1 - I_{TA}R_2)Z_{CTA}^{-1}. \quad (8)$$

Подставив (7), (8) в (2), получим трансцендентное уравнение для определения ВАХ диода. ВАХ и эффективность генерации зависят от положения ТГ между анодом и катодом и концентрацией электронов в *n*-области.

3. Результаты численных расчетов.

Расчеты проведены при следующих параметрах структуры и материала. Материал GaAs, с $n = 10^{16} - 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $\mu_n = 7000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$; площадь анодного контакта $S = 10^{-6} \text{ см}^2$ (10^{-4} см – толщина пленки). При расстоянии между катодом и анодом $l = 10^{-4} \text{ см}$ сопротивление от анода до катода $R_1 + R_2$ до порогового поля меняется от 10 Ом для $n = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ до 1 Ом для $n = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $I_{\text{max}} = 0,2 \text{ А}$, $U_{\text{max}} = 0,1 \text{ В}$, $I_S = 10^{-6} \text{ А}$, $b = 0,3$.

Емкость $C < 1 \text{ пФ}$ ($C = \epsilon \epsilon_0 S / L$, где L – толщина ТГ меньше 10^{-6} см). Для демонстрации наличия двух участков ОДП у диода нами рассматривается случай, когда ТГ находится вблизи катода $R_2 \ll R_1$ (рис. 2).

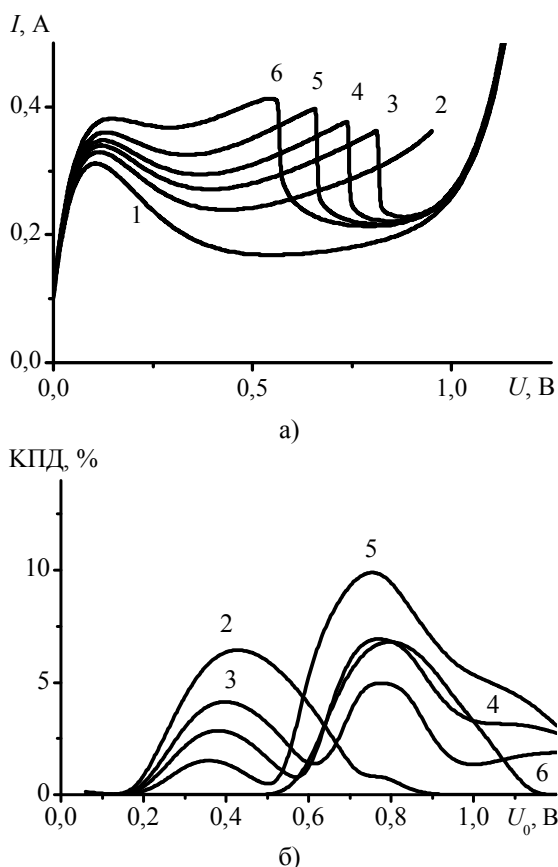


Рис. 2. ВАХ (а) и КПД (б) диода с ТА и ТГ при $I_{nz} = 0,1 \text{ А}$ на низких частотах при различных концентрациях электронов в канале: 1 – 10^{16} см^{-3} ; 2 – $2,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 3 – $3,3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 4 – $4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 5 – $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 6 – $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$

Из анализа ВАХ диода и эффективности генерации, вычисленной по ВАХ, следует:

- ВАХ диода с ТА и ТГ имеет два участка ОДП при разных напряжениях, первый из которых обусловлен ТГ, а второй – ТА.

- Изменение ОДП приводит к уменьшению КПД на первом участке по напряжению от 6,5 % ($n = 2,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) до 0,4 % ($n = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) и к увеличению КПД на втором участке по напряжению от 0,3 % ($n = 2,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) до 16 % ($n = 10^{17} \text{ см}^{-3}$). Приведенные величины получены при $R_2 = 0$ и на низкой частоте (рис. 2, 3).

- Изменение положения ТГ относительно анода и катода ($R_2 > 0$) также приводит к двум участкам генерации по напряжению с таким же изменением эффективности от концентрации в области канала. ВАХ диодов и эффективность генерации зависят и от других параметров диодов (избыточного тока ТГ и ТА (рис. 3), концентрации примесей и др.)

- При перемещении ТГ к аноду (растет R_1) уменьшаются КПД при меньших напряжениях и КПД при больших напряжениях. Оптимальным можно считать расположение ТГ на расстоянии 0,2l от катода.

- Возможны также ситуации, когда токи ТГ и ТА не совпадают, что может привести к другим особенностям ВАХ диода и его зон генерации по напряжению.

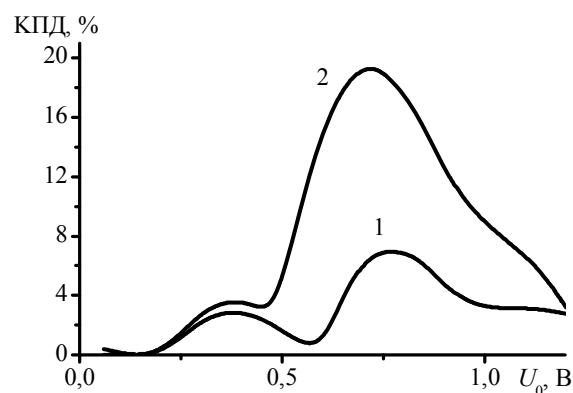


Рис. 3. КПД диода с ТА и ТГ при концентрации электронов в канале $n = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$: 1 – $I_{nz} = 0,1 \text{ А}$; 2 – $I_{nz} = 0,05 \text{ А}$ на низких частотах

4. Частотные зависимости КПД.

При любом положении ТГ относительно катода с увеличением частоты начинает сказываться шунтирующее влияние емкостей ТА и ТГ.

На рис. 4, а показано, как меняется ВАХ диода с двумя участками ОДП с изменением частоты. На низких частотах ВАХ имеет два участка ОДП: первый участок ОДП при меньших напряжениях возникает благодаря ТГ, а второй участок ОДП возникает из-за ТА.

С увеличением частоты сначала исчезает участок ОДП, обусловленный ТА (КПД умень-

шается с 7,3 % на 0,01 ГГц до 0,46 % на 1 ГГц). Первый же участок ОДП уменьшается медленнее и КПД уменьшается с 3 % при рабочей частоте 1 ГГц до 0,75 % при частоте 100 ГГц (рис. 4, б).

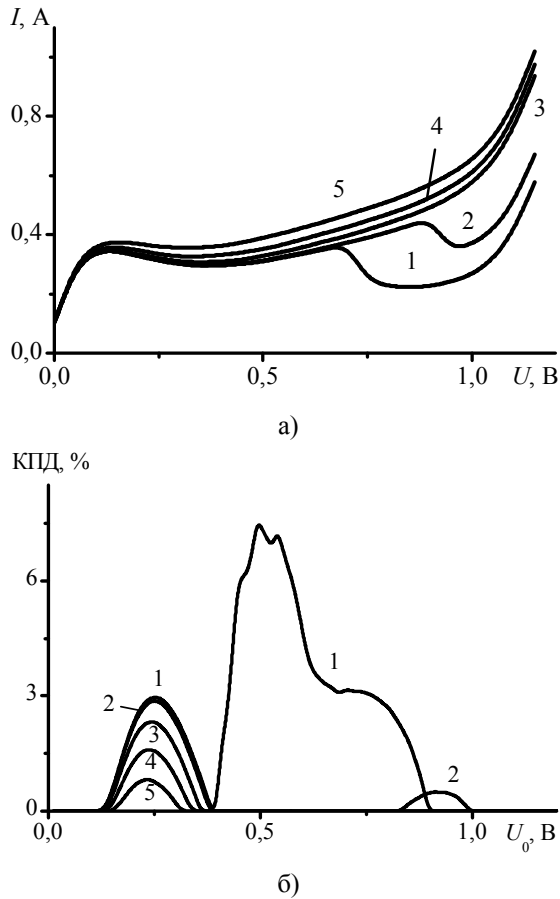


Рис. 4. ВАХ (а) и КПД (б) диода с ТА и ТГ при $I_{из} = 0,1$ А и концентрации электронов канала $n = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ($R_2 = 2,5$ Ом) на различных частотах: 1 – 10^7 ГГц; 2 – 1 ГГц; 3 – 10 ГГц; 4 – 50 ГГц; 5 – 300 ГГц

Частотные зависимости показаны на рис. 5, где 1 – первый участок ОДП, $I_{из} = 0,05$ А; 2 – второй участок ОДП, $I_{из} = 0,05$ А; 3 – первый участок ОДП, $I_{из} = 0,1$ А; 4 – второй участок ОДП, $I_{из} = 0,1$ А; 5 – первый участок ОДП, $I_{из} = 0,1$ А, $R_1 = 0,2R_2$; 6 – второй участок ОДП, $I_{из} = 0,1$ А, $R_1 = 0,2R_2$.

Здесь приведены КПД на первом участке ОДП и на втором участке ОДП. Первый участок обусловлен ТГ, а второй – ТА. Разница в максимальных частотах генерации на первом и втором участках обусловлена различными сопротивлениями канала, включенными последовательно с ТГ и ТА. Действительно, последовательно с ТГ включена часть канала R_1 , а последовательно с ТА – часть канала $R_1 + R_2$. Импеданс диода с ТГ можно записать в виде

$$Z_{ТГ} \approx R_S + R_1 + \frac{1}{-G_{ТГ} + i\omega C_{ТГ}}, \quad (9)$$

где R_S – сопротивления потерь диода ($R_S \ll R_1, R_2$); $-G, C$ – отрицательная дифференциальная проводимость и емкость ТГ. Для $\text{Re} Z < 0$ получаем максимальную частоту генерации:

$$f_{ТГ} < \frac{1}{2\pi C_{ТГ}} \left(\frac{G_{ТГ}}{R_S + R_1} - G_{ТГ}^2 \right)^{1/2}. \quad (10)$$

Максимальная частота генерации для ТГ наблюдается при $R_1 = 0$. При разных параметрах она может достигать сотен гигагерц. Максимальная частота ТА (второй участок по напряжению) всегда будет ниже из-за конечного сопротивления канала:

$$f_{ТА} \ll f_{ТГ}. \quad (11)$$

Отметим, что для ТА оценка $f_{ТГ}$ по формуле (10) будет несправедлива, поскольку при малых значениях G и больших R из формулы не следует, что $\text{Re} Z < 0$.

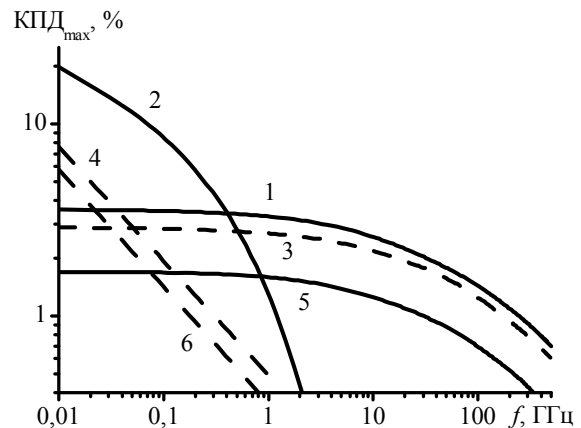


Рис. 5. Частотные зависимости максимального КПД диода с ТА и ТГ при концентрации электронов канала $n = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ($R_2 = 2,5$ Ом)

Это подтверждают зависимости на рис. 5, которые построены для случая $R_1 = 0$. При $R_1 > 0$ максимальная частота генерации ТГ будет уменьшаться. Например, при $G_{ТГ} \approx 1 \text{ См}$, $R_S \approx 0,05$ Ом и $R_1 = 0$ максимальная частота генерации ~ 600 ГГц, а при $R_1 = 0,5$ Ом максимальная частота ~ 140 ГГц.

Таким образом, генерация СВЧ-колебаний с помощью рассматриваемого диода возможна до частот приблизительно 100 ГГц с КПД от 10...15 % на частоте $< 0,01$ ГГц до долей процента на частотах свыше 100 ГГц. При увеличении тока ТГ эффективность генерации и частотный диапазон возрастают. Кроме того, увеличение частоты генерации возможно при уменьшении геометрических размеров диода.

Выводы. Таким образом, в результате проведенных расчетов показано, что планарный диод с ТА и ТГ может эффективно генерировать в диапазоне частот до 100 ГГц при приведенных нами параметрах областей и с ТГ, расположенной вблизи катода.

Диод с ТА и ТГ может иметь два участка ОДП и две зоны генерации по напряжению. Перемещение ТГ к аноду изменяет ВАХ диода и КПД. Такой диод может работать на частотах до 100 ГГц. Наибольший вклад в частотный диапазон работы вносит ТГ, расположенная вблизи катода.

Сочетания ТА или РТА с РТГ или ТГ, по-видимому, может привести к таким же результатам, которые рассмотрены выше.

Уменьшение параметров планарного диода, в частности площадей на порядок, может увеличить частотный диапазон работы планарного диода с ТГ до сотен гигагерц.

Библиографический список

1. Прохоров Э. Д. Отрицательная дифференциальная проводимость полупроводникового диода с туннельными боковыми гранями / Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула // Радиоп физика и электрон. – 2010. – 1(15), № 2. – С. 109–113.
2. Прохоров Э. Д. Влияние междолинного переноса электронов на эффективность генерации диодов с туннельными границами на основе GaAs / Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула, О. А. Клименко // Докл. НАН Украины. – 2012. – № 4. – С. 75–80.
3. Прохоров Э. Д. Генерация и умножение частоты диодами с туннельными границами на основе GaAs / Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула, О. А. Клименко // Радиоп физика и электрон. – 2011. – 2(16), № 3. – С. 91–96.
4. Прохоров Э. Д. Эффективность генерации диодов с резонансно-туннельными границами в «сэндвич»-варианте / Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула, О. А. Клименко // Радиоп физика и электрон. – 2012. – 3(17), № 3. – С. 72–78.
5. Esaki L. New Phenomenon in Narrow Germanium p-n junction / L. Esaki // Phys. Rev. – 1958. – 109, N 2. – P. 603–604.
6. Hall R. N. Tunnel diodes / R. N. Hall // IRE Trans. Electron Devices. – 1960. – ED-7, N 1. – P. 1–8.
7. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: в 2 т. Т. 2 / С. Зи; пер. с англ. под ред. Р. А. Сурица. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
8. Прохоров Э. Д. Твердотельная электроника / Э. Д. Прохоров. – Х.: ХНУ, 2008. – 544 с.

Рукопись поступила 17.02.2014.

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

GENERATION EFFICIENCY OF PLANAR DIODE WITH TUNNEL ANODE AND TUNNEL LATERAL BOUNDARY

The study of millimeter and submillimeter wave ranges is one of the topical tasks of radiophysics. However, there are not many active elements that can operate in the specified range. The diodes with tunnel anode (TA) and tunnel lateral boundary (TB) have been proposed. The current-voltage characteristics and generation efficiency of GaAs-based diode were investigated. The researches aim is the determination of tunnel anode and tunnel boundary parameters on a diode's characteristics in low and higher frequencies and a frequency limit estimating. The generating ability of diodes with tunnel anode and tunnel boundary in the range from tens to hundreds of GHz and the possible existence of two voltage regions with NDC and generation have been shown. The oscillation efficiency is 10–15 % on low frequency and percent share on frequencies is more than 100 GHz. The main properties of the proposed structures are determined and can be used for further detailed analysis of the physical processes of the structures and manufacturing.

Key words: GaAs-diodes, tunnel border, tunnel anode, current-voltage characteristic, generation efficiency, frequency range.

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

ЕФЕКТИВНІСТЬ ГЕНЕРАЦІЇ ПЛАНАРНОГО ДІОДА З ТУНЕЛЬНИМ АНОДОМ І ТУНЕЛЬНОЮ БІЧНОЮ МЕЖЕЮ

Освоєння міліметрового й субміліметрового діапазонів є однією з актуальних задач радіофізики. Проте на сьогодні набір активних елементів, що здатні працювати у вказаних діапазонах, є обмеженим. Одним із варіантів такого активного елемента є запропонований прилад – діод з тунельною бічною межею (ТБМ) і тунельним анодом (ТА). У роботі досліджуються вольтамперні характеристики й ефективність генерації планарних діодів з ТА і ТБМ на основі GaAs з метою визначення впливу параметрів ТА і ТБМ на вольтамперні характеристики й ефективність генерації на низьких і високих частотах, а також оцінки частотної межі роботи діодів. Дослідження показало можливість генерації діодами з ТА і ТБМ в діапазоні десятки-сотні гигагерців та можливість існування двох ділянок негативної диференціальної провідності та двох зон генерації по напрузі. Результати досліджень дозволили визначити основні властивості діодних структур, що були запропоновані, і є орієнтиром для подальшого детального аналізу фізичних процесів в них та практичній реалізації.

Ключові слова: GaAs-діоди, тунельна межа, тунельний анод, вольтамперні характеристики, ефективність генерації, діапазон частот.