

УДК 621.382.2

ИМПЕДАНСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАНАРНОГО ДИОДА С ТУННЕЛЬНОЙ ГРАНИЦЕЙ НА ОСНОВЕ GaAs

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

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,

4, пл. Свободы, Харьков, 61077, Украина

E-mail: e.d.prokhorov@mail.ru

Поступила в редакцию 14 апреля 2011 г.

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

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: отрицательная дифференциальная проводимость, туннельная граница, диод, туннелирование.

Розглядаються імпедансні характеристики діодів, в яких при певних напругах виникає від'ємна диференціальна провідність (ВДП) внаслідок тунелювання електронів через бокові межі діода, яка може бути використана для генерації, підсилення, множення. Визначаються залежності активної і реактивної складових імпедансу діода з тунельною межею для реальних параметрів діодів. Показано, що гранична частота ВДП діода знаходиться в терагерцевому діапазоні і залежить від його параметрів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: від'ємна диференціальна провідність, тунельна межа, діод, тунелювання.

The impedance characteristics of the diodes are consider, which negative differential conductivity (NDC) is arise under certain voltage, due to tunneling of electrons through the side faces of the diode, which can be used for generation, amplification and multiplication. Depending on the active and reactive components of impedance are determined of the diode with the tunnel boundaries for the real parameters of the diodes. It is shown that the limiting frequency of the diode NDC is in the terahertz range and depends on its parameters.

KEYWORDS: negative differential conductivity, tunnel boundary, a diode, the tunneling.

ВВЕДЕНИЕ

Рассматриваются диоды, в которых при определенных напряжениях между омическими контактами возникает отрицательная дифференциальная проводимость (ОДП) за счет туннелирования электронов через боковые границы диода, определяются импедансные характеристики в широком диапазоне частот и их зависимости от параметров структур. Принципы работы таких диодов описаны в работах [1-4]. Конфигурации диодов довольно сложные, распределения электрических полей и токов в структурах двумерные. Это осложняет точное описание, как параметров диодов, так и их вольтамперных и частотных характеристик. Цель настоящей работы – оценить частотные возможности планарных диодов с туннельной боковой границей.

ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ И ИМПЕДАНСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИОДОВ

Планарный диод с туннельной боковой границей p^+n^+ (ТГ) на канале n -типа между анодом и катодом показан на рис.1.

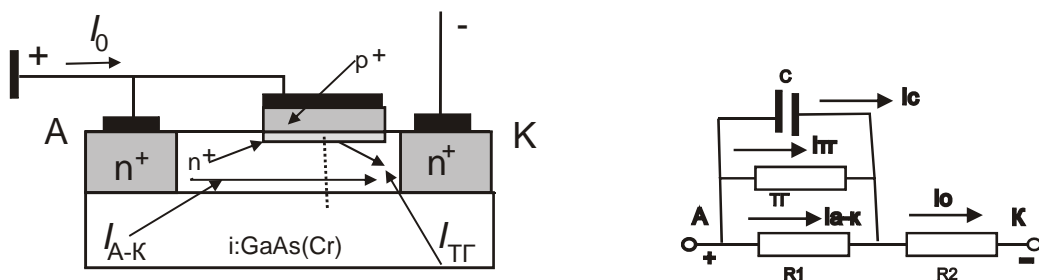


Рис. 1. Планарная структура диода с туннельной боковой границей p^+n^+ на эпитаксиальной пленке n -GaAs, выращенной на полуизолирующей подложке GaAs(Cr) и эквивалентная схема диода с боковой p^+n^+ ТГ.

Между анодом и катодом (А-К) протекает ток $I_{А-К}$. Напряжение между А-К таково, что туннельный n^+-p^+ переход (переход резкий с толщиной 100 -200 Å, в котором туннельная составляющая тока намного больше диффузионно-дрейфовой составляющей) включен в прямом направлении. Суммарный ток через n^+-p^+ переход – $I_{ТГ}$. При увеличении напряжения на диоде U_0 токи $I_{ТГ}$ и $I_{А-К}$ растут до тех пор, пока ток туннельной границы не достигнет максимального значения. При дальнейшем увеличении напряжения ток ТГ резко уменьшается, что приводит к уменьшению тока между А-К диода. При последующем увеличении напряжения U_0 ток $I_{ТГ}$ возрастает, как и ток $I_{А-К}$. Таким образом, диод А-К n^+-n-n^+ с боковыми границами в виде n^+-p^+ перехода обладает ОДП. В зависимости от напряженности электрического поля в канале или части канала может проявиться нелинейная зависимость тока через канал от напряженности электрического поля.

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

Планарный вариант диода, выполненного на эпитаксиальной пленке n -GaAs, выращенной на полупроводящей подложке и эквивалентная схема показана на рис.1. Схема упрощенная, но позволяющая оценить основные соотношения между напряжениями и токами в планарной структуре. Упрощение заключается в том, что ТГ с параметрами такими же как в «сэндвич» варианте [3,4], подключается в сечение канала, показанное пунктиром на рис.1 (двумерная задача переходит в одномерную). ТГ может быть соединена с любой точкой на длине канала (пунктир на рис.1) и сопротивление канала R_2 от этой точки до катода l_2 может меняться от долей Ом до единиц Ом.

Эквивалентная схема структуры представляет собой проводимость ТГ, параллельно которой включена емкость ТГ – C и часть канала R_1 . Последовательно с ними включена часть канала R_2 между ТГ и катодом. Ёмкость А-К намного меньше емкости ТГ ($l_1 \gg l_2$, l_1 - расстояние между А-К, l_2 - расстояние между ТГ и катодом). С увеличением частоты существенную роль будет играть емкостное сопротивление $Z_C = 1/\omega C$, которое включено параллельно активной проводимости ТГ.

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

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

где 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.

Сумма токов, протекающих через ТГ, емкость и сопротивление R_2 равна:

$$I_0(U) = I_{ТГ}(U) + U/R_1 + U/Z_C, \quad (2)$$

где U - напряжение на ТГ, емкости и R_1 .

Напряжение на всей структуре равно:

$$U_0 = U + I_0(U_0) \cdot R_2. \quad (3)$$

Зависимость тока через структуру I_0 от напряжения на структуре U_0 запишется в виде:

$$I_0(U_0) = \frac{U_0}{R_1 + R_2} + I_{ТГ}(U_0 - I_0(U_0)R_2) + (U_0 - I_0(U_0)R_2) \cdot \frac{1}{Z_C}. \quad (4)$$

Решая трансцендентное уравнения (4) находим ВАХ структуры в планарном варианте при постоянном R_2 . По ВАХ определяются максимальная ОДП.

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 $R = R_1 + R_2$ на основе GaAs дрейфовая скорость электронов имеет вид [7,8]:

$$v(U/l) = \frac{\mu_n \cdot (U/l) + v_s (U/U_p)^4}{1 + (U/U_p)^4}, \quad (5)$$

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 $v(E)$.

$$R_1 = \frac{l_1}{S} \frac{1}{en\mu(E)} = \frac{U}{enSv(U/l_1)}, \quad (6)$$

$$R_2 = \frac{l_2}{S} \frac{1}{en\mu(E)} = \frac{U_2}{enSv(U_2/l_2)}, \quad (7)$$

U_2 напряжение на R_2 , равное $U_2 = U_0 - U$.

Трансцендентное уравнение для тока через диод с учетом зависимостей (5) – (7) имеет вид:

$$I_0(U_0) = I_{\partial\bar{A}}(U_0 - I_{\partial\bar{A}}(U_0)R_2) + \frac{U_0 - I_{\partial\bar{A}}(U_0)R_2}{Z_C} + (U_0 - I_{\partial\bar{A}}(U_0)R_2) / R_1. \quad (8)$$

Зависимости тока через диод, тока через емкость, тока через R_1 показаны на рис. 2.

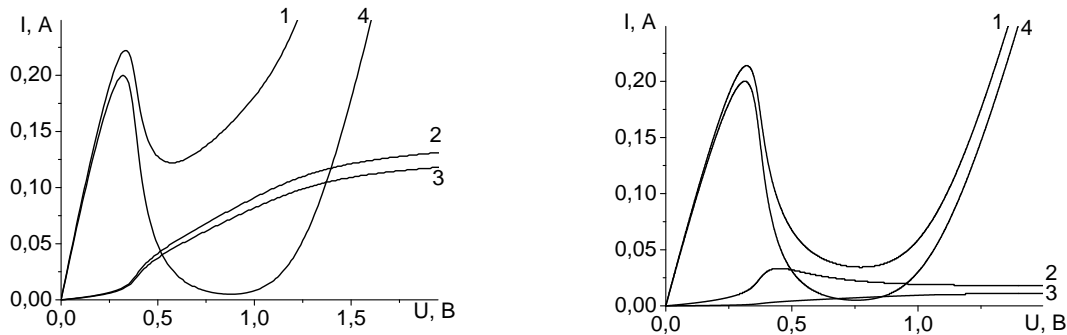


Рис.2. Общий ток через диод или сопротивление R_2 (1), ток через сопротивление R_1 (2), ток через емкость (3), ток проводимости ТГ (4). График слева для $R_1 = 10 \Omega$, $R_2 = 1 \Omega$, $l_2 = 0, l_1$. График справа для $R_1(U)$ при $l_2 = 0, l_1$.

Из анализа ВАХ диода следует, что при увеличении R_2 или увеличении l_2 ТГ смещается к аноду, что приводит 1) к увеличению напряжения U_{max} соответствующего I_{max} , 2) к увеличению напряжения U_{min} соответствующего I_{min} , 3) к уменьшению I_{max} и увеличению I_{min} , 4) к изменению максимальной ОДП ($-G$), (рис.3).

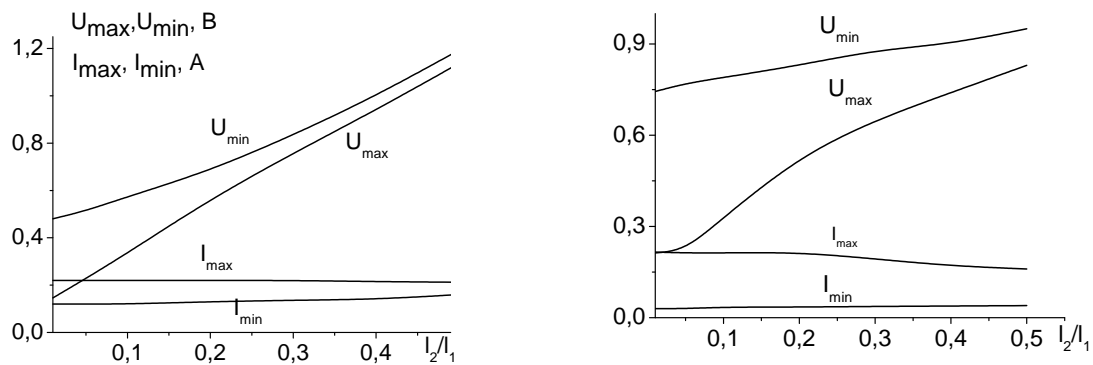


Рис. 3. Зависимость I_{max} , I_{min} , U_{max} , U_{min} от точки включения ТГ. Слева $R_2 = const$, справа $R_1(U)$.

По ВАХ диода определяются КПД в режиме генерации и ОДП и максимальная ОДП (-G). Импеданс такой структуры равен:

$$Z = R_2 + \frac{1}{1/R_1 - G + j\omega C}; \quad (9)$$

$$\operatorname{Re} Z = \frac{R_2(1 - GR_1)^2 + (\omega C)^2 R_1^2 R_2 + R_1(1 - GR_1)}{(1 - GR_1)^2 + (\omega C)^2 R_1^2}, \quad (10)$$

$$\operatorname{Im} Z = -\frac{\omega C R_1^2}{(1 - GR_1)^2 + (\omega C)^2 R_1^2}. \quad (11)$$

Полученные зависимости активной и реактивной составляющих импеданса позволяют оценить частотные зависимости структуры диода на рис. 4-5.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ

Реальная ВАХ ТГ при прямом смещении построена при следующих параметрах. Вариант А: материал GaAs, $n = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $\mu_n = 7000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $S_1 = 10^{-6} \text{ см}^2$, $l = 10^{-4} \text{ см}$, $R_1 \approx 10 \text{ Ом}$, $I_{\max} = 0,2 \text{ А}$, $U_{\max} = 0,1 \text{ В}$, $I_S = 10^{-6} \text{ А}$, $b = 0,3$. Сопротивление R_2 при $l_1 = 10^{-5} \text{ см}$ и $S_2 = 10^{-6} \text{ см}^2$ составляет порядка 1 Ом. Емкость $C = 1 \text{ пФ}$ ($C = \varepsilon \varepsilon_0 S / L$, где L – толщина ТГ $\sim 10^{-6} \text{ см}$).

Вариант Б: материал GaAs тот же, что и в варианте А, но другие площади и толщины: $S_1 \approx 10^{-7} \text{ см}^2$, $l_1 = 10^{-5} \text{ см}$, $l_2 = 10^{-6} \text{ см}$ и $S_2 = 10^{-7} \text{ см}^2$, $I_{\max} = 0,02 \text{ А}$, $U_{\max} = 0,1 \text{ В}$, $I_S = 10^{-7} \text{ А}$, $b = 0,3$. Емкость $C < 0,1 \text{ пФ}$.

Зависимости на рис. 4 показывают как зависит активная составляющая импеданса от параметров диода, в частности от емкости или площади контакта. Для емкости 1 пФ область отрицательной составляющей импеданса для параметров А простирается до 72 ГГц, для параметров Б (0,1 пФ) до 680 ГГц. В этих расчетах принято, что сопротивления канала практически не зависят от приложенного к каналу напряжения. Еще одна важная особенность планарного диода с ТГ – местоположение ТГ по отношению к катоду или аноду. На рис.5 показано как меняется область отрицательной активной составляющей импеданса для параметров А при изменении места подключения ТГ. Оказывается, что чем дальше от катода подключена ТГ, тем меньше область отрицательной активной составляющей импеданса. Это ограничивает частотные возможности планарного диода с ТГ по сравнению с «сэндвич» вариантом диода.

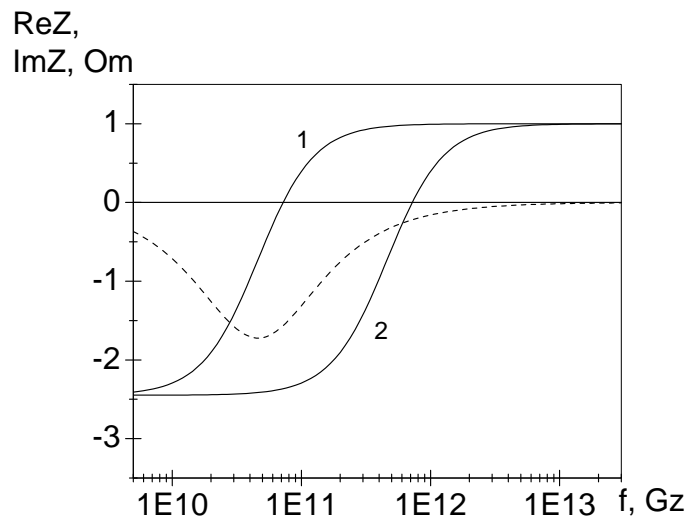


Рис. 4. Импедансные характеристики диода с ТГ, сплошная линия $\operatorname{Re} Z(f)$, пунктир $\operatorname{Im} Z(f)$ при постоянных R_1 и R_2 .

1 - (вариант А) $R_1 = 10 \text{ Ом}$, $R_2 = 1 \text{ Ом}$, $C = 1 \text{ пФ}$, $l_2 \approx 0,1l$;

2 - (вариант Б) $R_1 = 10 \text{ Ом}$, $R_2 = 1 \text{ Ом}$, $C = 0,1 \text{ пФ}$, $l_2 \approx 0,1l$.

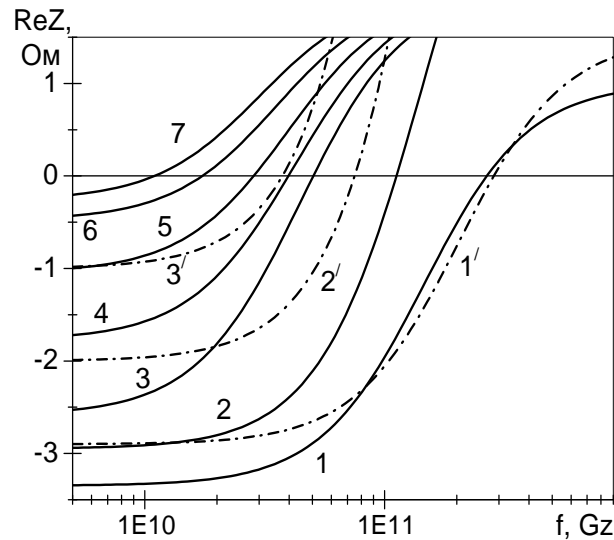


Рис. 5. Импедансные характеристики диода с ТГ, сплошная линия $\text{Re}Z(f)$ от положения ТГ при сопротивлениях R_1 и R_2 , не зависящих от напряжения для параметров варианта А при $G = -0,4 \text{ См}$, $C = 1 \text{ пФ}$. 1) $R_1 = 10 \text{ Ом}$, $R_2 = 0,1 \text{ Ом}$, $l_2 \approx 0,01l_1$; 2) $R_1 = 9,5 \text{ Ом}$, $R_2 = 0,5 \text{ Ом}$, $l_2 \approx 0,05l_1$; 3) $R_1 = 9 \text{ Ом}$, $R_2 = 1 \text{ Ом}$, $l_2 \approx 0,1l_1$; 4) $R_1 = 8 \text{ Ом}$, $R_2 = 2 \text{ Ом}$, $l_2 \approx 0,2l_1$; 5) $R_1 = 7 \text{ Ом}$, $R_2 = 3 \text{ Ом}$, $l_2 \approx 0,3l_1$; 6) $R_1 = 6 \text{ Ом}$, $R_2 = 4 \text{ Ом}$, $l_2 \approx 0,4l_1$; 7) $R_1 = 5 \text{ Ом}$, $R_2 = 5 \text{ Ом}$, $l_2 \approx 0,5l_1$; пунктиром показаны $\text{Re}Z(f)$ диода с ТГ от положения ТГ при сопротивлениях, зависящих от напряжения для параметров варианта А: 1' - $l_2 \approx 0,01l_1$, 2' - $l_2 \approx 0,1l_1$, 3' - $l_2 \approx 0,2l_1$.

Сопротивления R_1 и R_2 между А-К, как показано выше, зависят от приложенной напряженности электрического поля и с увеличением напряженности растут. Это приводит при тех же емкостях и проводимостях к изменению частотных диапазонов отрицательной активной составляющей импеданса. На рис. 5 (пунктиром) показаны зависимости активной составляющей импеданса от места подключения ТГ с учетом изменения сопротивлений канала при приложенных напряженностях электрического поля. 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 импедансные характеристики смещаются в область более низких частот. Это обусловлено тем, что при увеличении напряжения на канале или увеличении напряженности электрического поля в канале сопротивления возрастают в результате насыщения дрейфовой скорости электронов (формулы 5-7). При этом ВАХ структуры по отношению максимум-минимум на низких частотах лучше по сравнению с независимыми от напряжения сопротивлениями.

В случае зависимых от напряжения сопротивлений импедансные характеристики ухудшаются даже быстрее, чем при постоянных сопротивлениях. Так для $l_2 \approx 0,1l_1$ для не зависящих от напряжения сопротивлениях максимальная частота, на которой активная составляющая импеданса еще отрицательна составляет 112 ГГц, а для зависящих от напряжения сопротивлений максимальная частота составляет 75 ГГц (все данные для параметров А). Более точные значения частотных диапазонов, в которых диоды с ТГ 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 ТГ.

ВЫВОДЫ

Диоды с ТГ 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 200 ГГц. При уменьшении структур до наноразмеров предельные частоты, на которых возможна генерация, находятся в терагерцовом диапазоне.

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

Чем дальше от катода подключена ТГ в планарном диоде с ТГ, тем меньше область отрицательной активной составляющей импеданса по частоте, это ограничивает частотные возможности планарного диода с ТГ по сравнению с «сэндвич» вариантом диода.

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

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прохоров Э.Д., Боцула О.В. Отрицательная дифференциальная проводимость полупроводникового диода с туннельными боковыми гранями // Радиофизика и электроника.- **2010.**- 15, № 2.- С. 109-113.
2. Prokhorov E. D., Botsula O. V. Negative differential conductivity semiconductor diode with resonance border // Proc. 6 Int. symp. "Physics and engineering of MM and SubMM waves".- Kharkov, **2010**, section D, D-13.
3. Прохоров Э.Д., Боцула О.В. , Клименко О.А. Импедансные характеристики диодов с туннельными и резонансно-туннельными границами // Радиофизика и электроника, Харьков, ИРЭ НАНУ, **2011**, т. 16, №1 , с.54-57.
4. Прохоров Э.Д., Боцула О.В., Клименко О.А , Генерация и умножение частоты диодами с туннельными границами на основе GaAs Радиофизика и электроника, Харьков, ИРЭ НАНУ, **2011**, т. 16, № 3, с. 91-96.
5. *Esaki L.* New Phenomenon in Narrow Germanium p-n junction// L. Esaki// Phys.Rev.- 1958.-109. -р. 603-605.
6. *Hall R.N.* Tunnel diodes, IRE Trans.Electron Devices, ED-17, **1960**, 1.
7. *Zu C.* Физика полупроводниковых приборов: в 2 т. Т. 2. / С. Зи. -М.: Мир, **1984**. - 456 с.
8. Прохоров Э.Д. Твердотельная электроника.-Х: ХНУ им. В.Н. Каразина, **2008**.-544 с.