

ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА С ТУННЕЛЬНЫМИ БОКОВЫМИ ГРАНИЦАМИ

Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула

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

Рассматриваются диоды, 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 и умножения. Определяются условия реализации ОДП в диодах, токи, протекающие через диод, вольт-амперные характеристики диода, задачи, которые необходимо решить при дальнейших исследованиях диодов с туннельными или резонансно-туннельными боковыми границами. Предлагаются варианты планарных структур и структур типа «сэндвич». Ил. 6. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: отрицательная дифференциальная проводимость, туннельный диод, резонансно-туннельный диод, туннелирование.

Целый ряд полупроводниковых приборов обладают отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП). В основе их работы лежат туннелирование, резонансное туннелирование, захват электронов на рекомбинационные центры или перенос электронов в верхние по энергии долины зоны проводимости и др. [1].

Далее рассматриваются диоды, в которых при определенных напряжениях между омическими контактами возникает ОДП за счет туннелирования или резонансного туннелирования электронов через боковые границы диода, и определяются их вольтамперные характеристики (ВАХ).

1. Диод с туннельными границами. Рассматриваемый диод (рис. 1) представляет собой электронный полупроводник (Ge, Si, GaAs и др.) с омическими контактами n^+ . Концентрация в области между катодом К и анодом А составляет $5 \cdot 10^{15} \dots 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, концентрация в n^+ -областях катода и анода составляет $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Концентрации в сильнолегированных областях туннельного перехода n^+-p^+ составляют $10^{18} \dots 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Между анодом и катодом протекает ток I_0 , создающий падение напряжения в области между катодом и анодом. Падение напряжения между катодом и анодом таково, что туннельный n^+-p^+ -переход включен в прямом направлении [4]. Напряжение на длине n^+-p^+ -перехода различно, минимальное напряжение у анода, максимальное напряжение у катода. Токи, протекающие через туннельный n^+-p^+ -переход вдоль его длины, также разные. Суммарный ток через n^+-p^+ -переход I_T . При увеличении напряжения на диоде U_K токи I_T и I_0 растут до тех пор, пока ток туннельной границы не достигнет максимального значения. При дальнейшем увеличении напряжения ток туннельной границы резко уменьшается, что приводит к уменьшению тока между катодом и анодом дио-

да. При последующем увеличении напряжения U_K возрастает ток через туннельную границу I_T и ток I_0 .

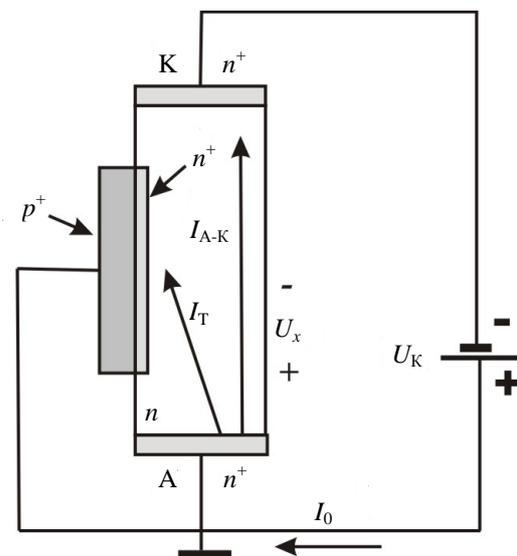


Рис. 1. Диод n^+-n-n^+ с боковыми туннельными границами в виде туннельного n^+-p^+ -перехода

Таким образом, диод n^+-n-n^+ с боковыми границами в виде n^+-p -перехода обладает ОДП. Для устранения закорачивания n^+ -слоем области между катодом и анодом перед n^+ -слоем можно ввести тонкий слой i -GaAs толщиной $50 \dots 100 \text{ \AA}$ («спейсер») [2].

Возможна структура диода n^+-n-n^+ с боковыми границами в виде p^+-n^+ -перехода. Такая структура даже предпочтительнее по сравнению с границей n^+-p^+ , поскольку исключается закорачивание участка n -области n^+ -областью туннельного перехода. В такой структуре катод и анод меняются местами (см. рис. 1), на нижний электрод подается минус напряжения, на верхний

электрод – плюс напряжения. Туннельная граница n^+-p^+ подключается к верхнему электроду (рис. 1) и включается в прямом направлении, в котором у туннельной границы имеется участок ОДП. Вся структура n^+-n-n^+ с боковыми границами n^+-p^+ также будет иметь участок ОДП.

Рассматриваемый диод может быть практически реализован в «планарном» варианте на эпитаксиальных пленках n -типа, выращенных на полупроводящей подложке (например, n -GaAs на i :GaAs(Cr)). Структуры показаны на рис. 2 и 3. Длина диода L может составлять единицы микрон в зависимости от диапазона частот, на которых будет работать рассматриваемый диод. Длина границы n^+-p^+ перехода может быть сравнима с длиной диода L , а также значительно меньше L . Электрическое поле на границе n - i -областей направлено таким образом, что оно препятствует переходу электронов в i -область, и поэтому ток через диод не зависит от параметров n - i -перехода. Диод может быть реализован и на эпитаксиальных пленках p -типа, выращенных на полупроводящей подложке.

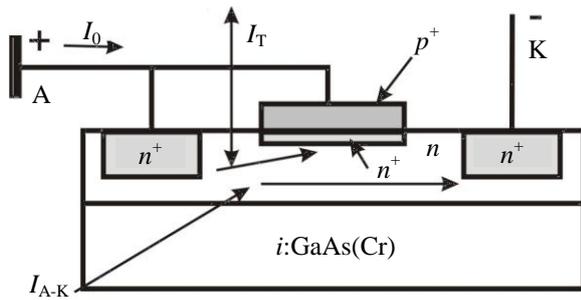


Рис. 2. Планарная структура диода с туннельной боковой границей n^+-p^+ на эпитаксиальной пленке n -GaAs, выращенной на полупроводящей подложке GaAs(Cr)

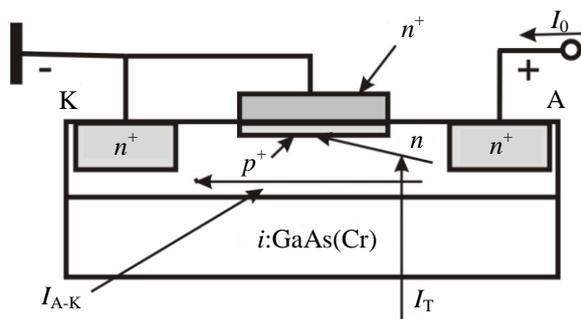


Рис. 3. Планарная структура диода с туннельной боковой границей p^+-n^+ на эпитаксиальной пленке n -GaAs, выращенной на полупроводящей подложке i :GaAs(Cr)

Кроме планарного диода, может быть реализован диод типа «сэндвич». Структура такого диода показана на рис. 4. Диод выполнен на эпитаксиальной пленке n -типа, выращенной на

сильнолегированной подложке n^+ -типа (например, n -GaAs – n^+ -GaAs).

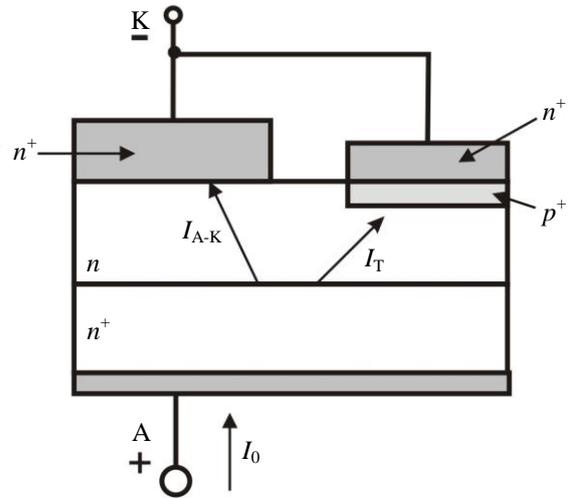


Рис. 4. Структура диода типа «сэндвич» с туннельной боковой границей p^+-n^+ на эпитаксиальной пленке n -GaAs, выращенной на сильнолегированной подложке n^+ -GaAs

В структуре на рис. 4 на нижний контакт $n-n^+$ подается плюс напряжения, а на верхний контакт, соединенный с туннельным переходом, – минус напряжения. При увеличении напряжения туннельная граница включена в прямом направлении и через нее протекает ток p^+-n^+ -перехода, который вначале растет, а затем при достижении максимума резко уменьшается, что приводит к ОДП диода между верхним и нижним омическими контактами (структура соответствует планарной структуре на рис. 3). Эффективной «сэндвич»-структурой является цельный верхний контакт, который наполовину представляет собой $n-n^+$ -контакт, а наполовину – p^+-n^+ -контакт. Когда прикладывается напряжение, то вначале основной ток протекает через p^+-n^+ -переход, а после достижения максимального тока и уменьшения его до минимума, основная часть тока протекает между омическими контактами. Таким образом, вся структура обладает ОДП. Такую же структуру можно выполнить на эпитаксиальном слое p -типа, выращенного на сильнолегированной подложке p^+ -типа. Следует отметить, что напряжения на структуре, при которых будет проявляться ОДП не велики и могут составлять доли и единицы вольт. А токи могут быть различными, они определяются площадью контактов, зависящих от частотного диапазона, в котором должен работать диод.

В отдельных случаях в качестве боковой границы могут быть использованы структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) с участком ОДП на ВАХ.

2. Диод с резонансно-туннельной границей. В качестве боковой в рассматриваемом

диоде может быть использован резонансно-туннельная граница (на рис. 2–4 вместо туннельной границы выполняется резонансно-туннельная граница). Резонансно-туннельная граница представляет собой, например, структуру [2, 3]

$$n^+-\text{GaAs-AlGaAs-GaAs-AlGaAs-}n^+-\text{GaAs},$$

где AlGaAs – барьеры, а GaAs – квантовая яма. Диод n^+-n-n^+ с боковыми резонансно-туннельными границами обладает ОДП.

Диод с резонансно-туннельной границей может быть выполнен в планарном варианте или в структуре типа «сэндвич». В планарном варианте диод выглядит аналогично диоду, представленному на рис. 2.

Как известно [3], ток через резонансно-туннельную границу в зависимости от приложенного напряжения может иметь не один максимум. Это зависит от количества дискретных энергетических уровней в квантовой яме. Если высота потенциального барьера $n^+-\text{GaAs-AlGaAs}$ составляет 0,2...0,3 эВ, то в квантовой яме находится один энергетический уровень 0,16 эВ, если высота барьера ~0,7 эВ, то в квантовой яме два энергетических уровня 0,16 и 0,64 эВ [5]. Соответственно, ток через резонансно-туннельную границу будет иметь два максимума.

Структура типа «сэндвич» аналогична показанной на рис. 4. Если резонансно-туннельная граница симметрична, что возможно при одинаковых барьерах и одинаковой лигатуре прилегающих к барьерам n^+ -областей, то при изменении полярности напряжения структура анод-катод будет также иметь участок ОДП. В этом существенное отличие структуры с резонансно-туннельной границей от структуры с туннельной границей, у которой при обратной полярности приложенного напряжения нет участка ОДП.

3. ВАХ диодов. Все рассмотренные структуры двумерные, поэтому для определения распределения электрического поля в структуре, токов в структуре и интегральных характеристик необходимо решать двумерные задачи.

В первом приближении можно не учитывать различие токов вдоль границы туннельного или резонансно-туннельного перехода и считать полный ток через переходы равным I_T . Таким образом, общий ток через диод $I_0(U)$ в одномерном приближении состоит из тока через туннельную $I_T(U)$ или резонансно-туннельную $I_{\text{PT}}(U)$ границу и тока через промежуток анод-катод $I_{\text{A-K}}(U)$

$$I_0(U) = I_T(U) + I_{\text{A-K}}(U); \quad (1)$$

$$I_0(U) = I_{\text{PT}}(U) + I_{\text{A-K}}(U), \quad (2)$$

где U – приложенное к диоду напряжение. Выражения (1), (2) является ВАХ диодов. Рассмотрим составляющие тока диода.

Ток $I_{\text{A-K}}(U)$ определяется через параметры материала n -области и приложенное напряжение:

$$I_{\text{A-K}} = \frac{en\mu_n S}{L} U, \quad (3)$$

где n , S – концентрация электронов в n -области и площадь между катодом и анодом; μ_n – подвижность электронов в n -области; L – расстояние между катодом и анодом. И в планарной структуре, и в структуре типа «сэндвич» выражения (1), (2) приближенно отражают действительный ток между анодом и катодом.

Ток $I_T(U)$ представляет собой туннельный ток n^+-p^+ -перехода, который может быть записан в виде [1, 4]

$$I_T(U) = A' \int_0^{F_n+F_p-eU} (f_n(\varepsilon) - f_p(\varepsilon)) \times \times (F_n + F_p - eU - \varepsilon)^{1/2} \varepsilon^{1/2} d\varepsilon, \quad (4)$$

где F_n , F_p – уровни Ферми в p^+ - и n^+ -областях; $f_n(\varepsilon)$, $f_p(\varepsilon)$ – функции Ферми-Дирака, равные:

$$f_n(\varepsilon) = (\exp \frac{\varepsilon - F_n}{kT} + 1)^{-1};$$

$$f_{pn}(\varepsilon) = (\exp \frac{\varepsilon - F_p}{kT} + 1)^{-1}, \quad (5)$$

где A' – постоянная, включающая в себя коэффициент прозрачности барьера, эффективные массы электронов и дырок.

Ток $I_T(U)$ может быть записан и в виде аппроксимации

$$I_T(U) = I_{\text{max}} \frac{U}{U_{\text{max}}} \exp(1 - \frac{U}{U_{\text{max}}}) + + I_{\text{max}} \exp(A(U - U_{\text{max}})) + I_S \exp(b \frac{eU}{kT} - 1), \quad (6)$$

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. Отношение $I_{\text{max}}/I_{\text{min}}$ может меняться от единиц до 30...40 для GaAs.

ВАХ структуры строится как сумма токов (3) и (5) при изменении напряжении U на диоде. Построенная характеристика структуры с учетом токов (1) и (6) показана на рис. 5: 1 – ток туннельной границы с учетом диффузионного тока при прямом смещении; 2 – диффузионный ток прямо смещенной туннельной границы n^+-p^+ ; 3 – ток между катодом и анодом; 4 – суммарный

ток, примерно соответствующий току рассматриваемого диода с туннельной боковой границей; 5 – ток (в основном туннельный) через диод при обратном смещении.

Зависимость характеризуется I'_{\max} и I'_{\min} большими, чем у туннельного диода, и при отличных от туннельного диода напряжениях. Характеристика имеет участок ОДП, который определяется соотношением максимального и минимального токов. При изменении полярности напряжения на структуре будет преобладать туннельный ток туннельной границы, который резко возрастает при увеличении напряжения (рис. 5).

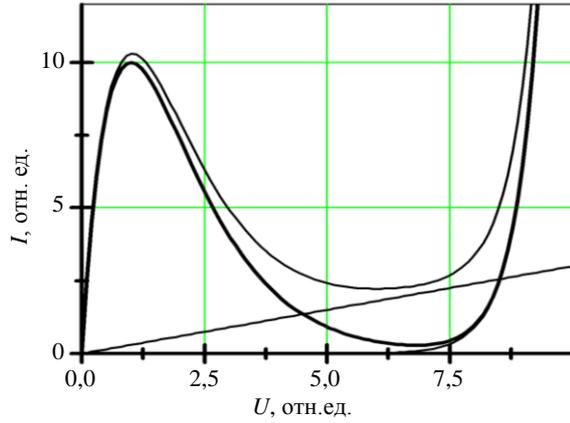


Рис. 5. Качественные ВАХ диода с туннельной границей

Более сложные семейства ВАХ получаются при подаче напряжения на n^+p^+ -туннельный переход разной полярности, что требует отдельного рассмотрения.

Ток резонансно-туннельной границы $I_{РТ}(U)$ равен [6, 7]:

$$I_{РТ}(U) = I_1(U) + I_2(U); \quad (7)$$

$$I_1(U) = \frac{em_n^*kT}{4\pi^2\hbar^3} \int_0^W |D_p|^2 \ln \frac{1 + e^{\frac{F-\varepsilon}{kT}}}{1 + e^{\frac{F-\varepsilon-eU}{kT}}} d\varepsilon; \quad (8)$$

$$I_2(U) = \frac{em_n^*kT}{4\pi^2\hbar^3} e^{\frac{W}{kT}} (e^{\beta \frac{eU}{kT}} - 1), \quad (9)$$

где $I_1(U)$ – резонансно-туннельный ток; $I_2(U)$ – надбарьерный ток термоэлектронной эмиссии; F – уровень Ферми, отсчитанный от дна зоны проводимости n^+ -области; ε – энергия электрона; m_m^* – эффективная масса электрона; $|D_p|^2$ – коэффициент прозрачности резонансно-туннельной границы, определенный ранее [5]; W – высота потенциальных барьеров резонансно-туннельной границы; T – температура; β порядка 0,3...0,5 для туннельно-резонансной структуры;

ширина квантовой ямы для исследованных структур составляла $a = 5$ нм; ширина одинаковых барьеров в $b_1 = b_2 = b \approx 2...3$ нм [6].

В расчетах можно воспользоваться аналитическими зависимостями для резонансно-туннельного тока в виде [8]

$$I_1(U) = A \ln \frac{1 + e^{\frac{B-C}{kT}}}{1 + e^{\frac{B-C+n_1U}{e/kT}}} \left(\frac{\pi}{2} + \arctg \frac{C - n_1U}{D} \right); \quad (10)$$

$$I_2(U) = H \left(e^{n_2 \frac{eU}{kT}} - 1 \right). \quad (11)$$

Здесь A, B, C, D, H, n_1, n_2 – величины, присущие рассматриваемой резонансно-туннельной структуре.

Если резонансно-туннельная граница симметрична, то ВАХ диода при различных полярностях прикладываемого напряжения будет иметь участки ОДП при прямом и обратном включениях. ВАХ такого диода показана на рис. 6. Если резонансно-туннельная граница не симметрична, то при различных полярностях напряжения будут наблюдаться различные величины ОДП.

ВАХ на рис. 6 построена для резонансно-туннельной границы $n^+GaAs-Al_{0,2}Ga_{0,8}As-GaAs-Al_{0,2}Ga_{0,8}As-n^+GaAs$ с одинаковыми барьерами и концентрациями в прилегающих к барьерам областях. ВАХ симметрична и имеет одинаковые ОДП при прямом и обратном включениях.

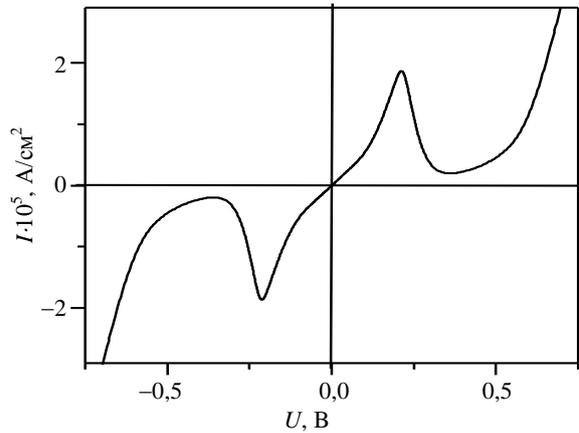


Рис. 6. ВАХ диода n^+n^+ с симметричной резонансно-туннельной границей $Al_{0,2}Ga_{0,8}As/GaAs$ с высотой барьеров 0,25 эВ при прямом и обратном включениях

Можно использовать резонансно-туннельную границу с двумя энергетическими уровнями в квантовой яме, например $AlAs/GaAs$. Первый энергетический уровень создает максимум тока при $\sim 0,2$ В, второй уровень создает максимум тока при $\sim 1,0$ В, а резкий рост тока начинается при $\sim 1,75$ В. Такой диод обладает большой

нелинейностью и может эффективно использоваться для умножения частоты.

Реальные зависимости тока через диод от приложенного напряжения, частотные зависимости активной и реактивной составляющих импеданса структуры, предельные частоты работы структуры, эффективность генерации структур в диапазоне частот можно получить, используя конкретные параметры материала n -области и геометрию структуры.

Выводы. Показано, что диоды $n^+ - n - n^+$ с туннельными или резонансно-туннельными границами обладают ОДП вследствие туннелирования или резонансного туннелирования электронов через боковые границы диодов.

Показано, что диоды $n^+ - n - n^+$ с туннелированием или резонансным туннелированием через боковые границы могут быть выполнены в планарном варианте и в варианте типа «сэндвич».

Проанализированы ВАХ диодов $n^+ - n - n^+$ с учетом туннелирования и резонансного туннелирования и показано, что участок ОДП определяется параметрами туннельных и резонансно-туннельных границ, материалом рабочей области диода и геометрией структуры.

Большая нелинейность ВАХ диодов при небольших напряжениях и мощностях делают эти структуры привлекательными для умножения частоты в СВЧ-диапазоне.

Для определения перспективности рассмотренных диодов необходимо исследовать реальные ВАХ, эффективности генерации и умножения частоты в широком диапазоне частот.

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: в 2 т. Т. 2. / С. Зи. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
2. Долманов И. Н. Полупроводниковые приборы с резонансным туннелированием / И. Н. Долманов, В. И. Толстихин, В. Г. Еленский // Зарубеж. радиоэлектрон. – 1990. – № 7. – С. 66–89.
3. Бузанева Е. В. Микроструктуры интегральной электроники / Е. В. Бузанева. – М.: Радио и связь, 1990. – 304 с.
4. Esaki L. New Phenomenon in Narrow Germanium $p-n$ junction / L. Esaki // Phys. Rev. – 1958. – 109. – P. 603–605.

5. Драгунов В. П. Основы нанозлектроники / В. П. Драгунов, И. Г. Неизвестный, В. А. Гридчин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 332 с.
6. Кравченко А. Ф. Электронные процессы в твердотельных системах с пониженной размерностью / А. Ф. Кравченко, В. Н. Овсяк. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 448 с.
7. Roger Lake. Physics Based model for the RTD quantum capacitance / Lake Roger, Yang Junjie // IEEE Transactions Electron devices. – 2003. – 50, N 3. – P. 785–789.
8. 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.

NEGATIVE DIFFERENTIAL CONDUCTIVITY SEMICONDUCTORS DIODE WITH TUNNEL SIDE BORDERS

E. D. Prokhorov, O. V. Botsula

The diode that have negative differential conductivity (NDC) due to tunneling or resonance tunnel electron through lateral facet of the diode is considered. This diodes cab be used for generation, amplifier and frequency multiplication. The arising condition of NDC, current and current-voltage characteristics have been determined. The planar and type of “sandwich” diode structures are conceded.

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

НЕГАТИВНА ДИФЕРЕНЦІЙНА ПРОВІДНІСТЬ НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ДІОДА З ТУНІЛЬНИМИ БІЧНИМИ МЕЖАМИ

Е. Д. Прохоров, О. В. Боцула

Розглядаються діоди, у яких при певних напругах виникає негативна диференційна провідність (НДП) внаслідок тунелювання або резонансного тунелювання електронів крізь бічні межі діода, яка може бути використана для генерації, підсилення та помноження. Визначено умови реалізації НДП у діодів, струми, що проходять крізь діод, вольт-амперні характеристики діода, задачі, які необхідно розв'язати при подальших дослідженнях діодів з тунельними або резонансно-тунельними бічними межами. Пропонуються варіанти планарних структур і структур типу «сэндвич».

Ключові слова: негативна диференційна провідність, тунельний діод, резонансно-тунельний діод, тунелювання.

Рукопись поступила 17 декабря 2009 г.