

**РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ НА ОСНОВЕ НИТРИДОВ
AlN/Al_xGa_{1-x}N, GaN/In_xGa_{1-x}N**

О. В. Боцула, Э. Д. Прохоров, И. П. Безмаль

*Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина
4, пл. Свободы, Харьков, 61077, Украина
E-mail: Oleg.V.Botsula@univer.khakov.ua*

Рассматриваются резонансно-туннельные диоды (РТД) на основе двойных и тройных соединений нитридов AlN, GaN, InN с большим количеством энергетических уровней в квантовых ямах. Расчитаны вольтамперные характеристики резонансно-туннельных диодов с числом уровней в квантовой яме до пяти. Показано, что такие РТД могут иметь до пяти участков с отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП). Определены возможные эффективности генерации на всех участках ОДП. Сделаны оценки максимальных частот генерации на каждом участке ОДП. Ил. 6. Табл. 1. Библиогр.: 6 назв.

Ключевые слова: резонансно-туннельные диоды, эффективность генерации, отрицательная дифференциальная проводимость.

Наиболее изученными являются РТД, в которых в качестве материала для квантовой ямы используется GaAs с барьерами из AlAs, AlGaAs. Отработана технология изготовления таких структур, позволяющая стабильно получать диоды с ОДП при комнатной температуре. В практически изготавливаемых диодах по обе стороны РТД вводят тонкие слои нелегированного материала *i*-GaAs (спейсеры – толщина 5...15 нм). Это делается для того, чтобы ослабить влияние кулоновских полей примесей в сильнолегированных областях GaAs на РТД, в то же время эти слои не являются препятствием для пролета электронов из сильнолегированных областей к входному барьеру РТД (длина свободного пробега электронов больше протяженности спейсера). Чем больше толщина спейсера (в пределах 5...15 нм), тем больше отношение максимального тока к минимальному на вольтамперной характеристике (ВАХ) диода (для диода AlGaAs/GaAs отношение этих токов увеличивается в 2,5...3 раза при увеличении длины спейсеров от 0 до 15 нм) [1].

В формировании ВАХ РТД существенную роль играет накопление объемного заряда на барьерах и в квантовой яме, которое особенно сильно в области ОДП. Это является причиной наблюдаемых гистерезисов ВАХ РТД на постоянном токе. Помимо РТД на основе гетеропары AlGaAs/GaAs созданы структуры на основе InP/InGaAs, AlAs/InGaAs, AlGaAs/InGaAs.

Потребность в поисках новых материалов для РТД связана с возможностью достичь больших плотностей токов в материалах с более высокой, чем у GaAs, допустимой степенью легирования и больших мощностей СВЧ приборов. Обнадеживающие результаты по величине ОДП и значениям пиковых токов получены со структурами InAlAs/InGaAs, AlAs/InGaAs.

Цель работы – исследовать возможности использования в качестве материалов для РТД соединений на основе азота AlN, GaN, InN.

Материалы на основе азота начали находить применение сравнительно недавно, поэтому и параметры двойных соединений, не говоря уже о тройных соединениях InGaN, AlGaN, известны недостаточно точно. Однако в литературе имеются сведения, которые необходимы для расчета РТД на основе этих соединений [2], приведенные в таблице и рис. 1.

Нитриды	InN	GaN	AlN
E_g , эВ	1,89	3,39	6,2
m_Γ / m_0	0,11	0,195	0,2

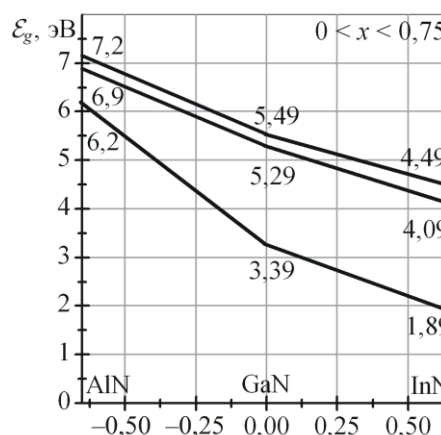


Рис. 1. Зависимость ширины запрещенной зоны от массовой доли одного из компонент в соединении

Отличительной особенностью рассматриваемых соединений является большая ширина запрещенной зоны и высота потенциальных барьеров в резонансно-туннельных структурах на их основе.

ВАХ РТД описывается выражениями [3, 4]

$$J(V) = J_1(V) + J_2(V); \quad (1)$$

$$J_1(V) = \frac{em_n^*kT}{2\pi^2\hbar^3} \int_0^W |D_p|^2 \ln \frac{1 + e^{\frac{F-E}{kT}}}{1 + e^{\frac{F-E-eV}{kT}}} dE; \quad (2)$$

$$J_2(V) = \frac{em_n^*kT}{2\pi^2\hbar^3} e^{-\frac{W}{kT}} (\exp(\beta \frac{eV}{kT}) - 1), \quad (3)$$

где $J_1(V)$ – резонансно-туннельный ток; $J_2(V)$ – надбарьерный ток; F – уровень Ферми, отсчитанный от дна зоны проводимости n^+ -области; ε – энергия электрона; m_n^* – эффективная масса электрона; $|D_p|^2$ – коэффициент прозрачности резонансно-туннельной структуры, определенный ранее [5]; W – высота потенциальных барьеров РТД; T – температура; $\beta = 0,3$ для данной структуры; ширина квантовой ямы для всех исследованных структур составляла $a = 5$ нм, ширина одинаковых барьеров в $b_1 = b_2 = b \approx 2...3$ нм [6].

Пользуясь методикой [5] для различных составов соединений были определены высоты потенциальных барьеров РТД, положение энергетических уровней в квантовой яме РТД с различной высотой потенциальных барьеров, коэффициенты прозрачности, вольтамперные характеристики РТД и эффективность генерации РТД на различных участках вольтамперной характеристики.

В зависимости от используемых в РТД полупроводниковых соединений возможны следующие варианты:

- в качестве потенциальных барьеров использовался AlN, а в качестве квантовой ямы $Al_xGa_{1-x}N$;
- в качестве потенциальных барьеров использовался $Al_xGa_{1-x}N$, а в качестве квантовой ямы GaN;
- в качестве потенциальных барьеров использовался $In_xGa_{1-x}N$ с различными составами по x , а в качестве квантовой ямы InN;
- в качестве потенциальных барьеров использовался GaN, а в качестве квантовой ямы с различными составами по x $In_xGa_{1-x}N$.

Рассмотрим РТД AlN/ $Al_xGa_{1-x}N$. Барьеры образованы слабелегированным широкозонным полупроводником AlN с толщиной b , квантовая яма шириной a образована $Al_xGa_{1-x}N$, слева и справа от барьеров сильнолегированный n^+ – $Al_xGa_{1-x}N$ с концентрацией примесей $5 \cdot 10^{17}...10^{18} \text{ см}^{-3}$ и омическими контактами.

Высоты потенциальных барьеров определяются разрывом зоны проводимости гетероперехода AlN/ $Al_xGa_{1-x}N$ с использованием правила

Дингла [1]. Толщины слоев составляют $a \approx 5$ нм, $b \approx 1...3$ нм. В этом случае в квантовой яме оказываются несколько энергетических уровней, положение которых зависит от эффективной массы электрона и ширины ямы. Полученные значения энергетических уровней для AlN/GaN следующие: $E_1 = 0,0675$ эВ; $E_2 = 0,27$ эВ; $E_3 = 0,6075$ эВ; $E_4 = 1,08$ эВ; $E_5 = 1,6875$ эВ. Расчитанная вольтамперная характеристика РТД AlN/GaN показана на рис. 2.

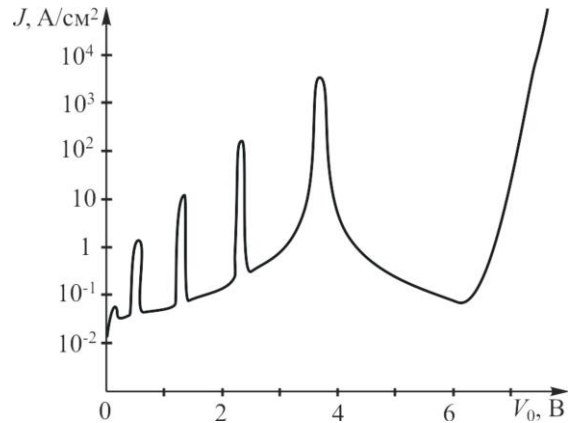


Рис. 2. Вольтамперная характеристика РТД AlN/GaN с 5-ю резонансными уровнями в квантовой яме

На фоне общего нарастания тока через структуру хорошо видны резонансные пики тока, соответствующие каждому из резонансных уровней. С увеличением номера энергетического уровня максимальный ток в пике растет и превышает ток первого пика на несколько порядков (рис. 2).

Это обусловлено меньшей высотой барьера для верхнего уровня в квантовой яме по сравнению с более глубокими уровнями, о чем свидетельствуют и коэффициенты прозрачности для различных уровней в квантовой яме. Резкое возрастание коэффициента прозрачности происходит при энергиях, соответствующих дискретным уровням в квантовой яме. Если для наиболее глубокого уровня коэффициент прозрачности $D \sim 10^{-9}$, то для верхнего уровня $D \sim 10^{-2}$, суммарный же коэффициент еще выше.

С каждым пиком ВАХ связан участок с ОДП, который следует за участком роста тока, причем при толщинах барьера 2 нм первые максимумы проявляются слабо. С уменьшением толщины барьеров происходит возрастание общего тока через диод. Ток в максимумах вольтамперной характеристики также возрастает, и первые максимумы становятся более заметными.

При использовании гетеропары AlN/AlGaIn число пиков тока достигает пяти с соответствующими участками ОДП. На рис. 3 приведены мак-

симальные значения токов в пиках ВАХ для РТД $\text{AlN}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Из этих характеристик видно, что в пределах одной гетеропары с возрастанием доли галлия в материале, из которого создается яма, величины пиковых значений тока возрастают. Максимальные токи в пиках ВАХ для РТД с меньшим количеством уровней превышают максимальные токи в РТД с большим количеством уровней. Ток через первый уровень РТД $\text{AlN}/\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{N}$ превышает ток через первый уровень РТД AlN/GaN на два порядка. Это можно сказать и о других уровнях в квантовых ямах этих РТД.

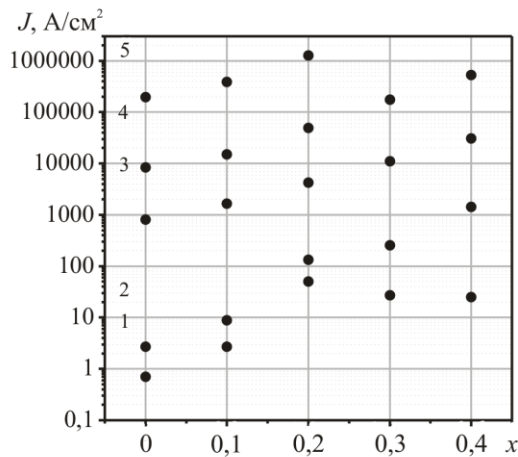


Рис. 3. Значения пиковых токов при различной доли Al в РТД на основе гетеропары $\text{AlN}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

Аналогичный предыдущим анализ проведен и для РТД $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{InN}$. В рассматриваемой структуре параметры барьеров и ямы выбирались соответственно структуре AlN/AlGaN . Высота барьеров и значения энергетических уровней в яме отличны от предыдущего соединения (рис. 4.). Эффективная масса электрона изменяется в зависимости от доли x в соединениях в пределах значений $0,20 \div 0,11$ для AlN и InN соответственно.

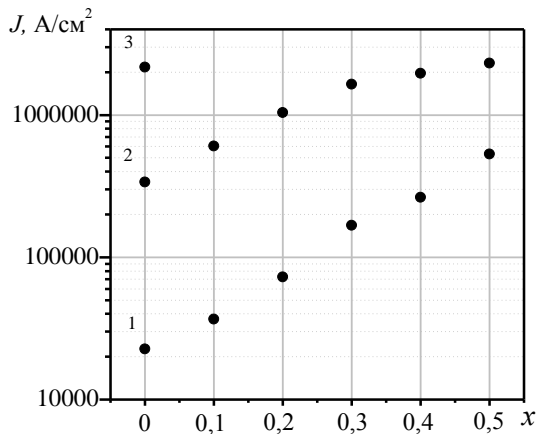


Рис. 4. Значения пиковых токов при различной доли In в РТД на основе гетеропары $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{InN}$

Исследование энергетических характеристик РТД проводилось в предположении о том, что диоды работают в одноконтурном резонаторе и на них действует постоянное напряжение V_0 и переменное напряжение V_1

$$V(t) = V_0 + V_1 \sin \omega t. \quad (4)$$

По ВАХ при каждом V_0 определяется форма тока через диоды $J(t)$, которая разлагается в ряд Фурье, и определяется постоянная составляющая тока через диод и амплитуда первой гармоники тока J_1 .

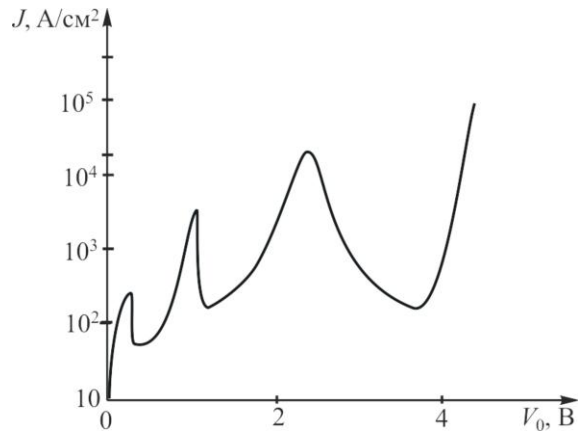


Рис. 5. ВАХ РТД на основе гетеропары GaN/InN , высота барьера 1,275 эВ

Далее определяется мощность и КПД. При каждом значении напряжения V_0 амплитуда V_1 оптимизируется по максимальному КПД.

Рассчитанные зависимости эффективности генерации от напряжения смещения приведены на рис. 6.

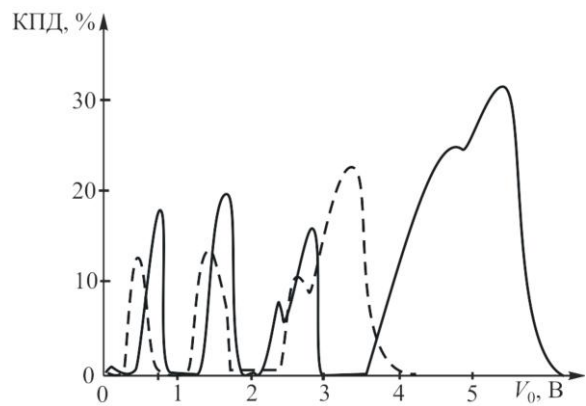


Рис. 6. Зависимость эффективности генерации от напряжения смещения для РТД на основе AlN/GaN (сплошная линия), GaN/InN (прерывистая линия)

Максимальные значения КПД на всех максимумах ВАХ наблюдаются при напряжениях, близких к напряжениям, соответствующим

максимальным токам РТД и участкам ОДП ВАХ. Провалы в зависимостях КПД от напряжения питания на последнем и предпоследнем уровнях для РТД GaN/InN и на последнем уровне РТД GaN/InN обусловлен заходом переменной амплитуды напряжения на два участка ОДП ВАХ РТД.

Сравнивая характеристики РТД, можно отметить, что для РТД, у которых в квантовой яме существуют четыре или пять уровней, эффективность генерации на всех уровнях выше, чем у РТД с меньшим количеством уровней.

В рамках принятой нами модели это можно объяснить прежде всего влиянием высоты барьера, который определяет соотношения между механизмами переноса заряда (резонансным туннелированием и надбарьерной эмиссией). Во всех рассмотренных РТД эффективность генерации имеет наибольшее значение на последнем участке ОДП.

В РТД контрастность ВАХ во многом зависит от доли нерезонансных составляющих тока, в данном случае от величины тока надбарьерной эмиссии. В РТД с высоким барьером эта составляющая меньше, что в итоге сказывается на эффективности генерации. В то же время при высоких барьерах уширение верхних уровней может достигать значительной величины, что увеличивает долю туннелирующих через эти уровни электронов, и в некоторой степени приводит к снижению контрастности.

Таким образом, для рассмотренных РТД можно определить оптимальное значение высоты барьера. Так, для $\text{AlN}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ оптимальной является высота барьера 1,53 эВ.

Аналогичные характеристики и параметры могут быть определены и для РТД $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$, $\text{GaN}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Быстродействие механизма проводимости ограничивается влиянием присущих диоду емкости C , сопротивления потерь R_s (это сопротивление прилегающих к РТД областей) и ОДП $-G$ на каждом участке ОДП ВАХ. Активная и реактивная составляющие импеданса диода на каждом участке ОДП записываются в виде [1]

$$\text{Re } Z(\omega) = \frac{R_s G^2 (V_0) \mp G(V_0) + \omega^2 C^2 R_s}{G^2 (V_0) + \omega^2 C^2}; \quad (5)$$

$$\text{Im } Z(\omega) = -\frac{\omega C}{G^2 (V_0) + \omega^2 C^2}. \quad (6)$$

В выражения входят C , R_s , ω и проводимость $G(V_0)$, зависящая от приложенного напряжения V_0 . В формулах записана проводимость со знаком минус для участков ВАХ с ОДП.

Максимальные частоты генерации на каждом участке ОДП ВАХ определяются из выражения

$$f_{\max} < \frac{1}{2\pi C} \sqrt{\frac{G}{R_s} - G^2}. \quad (7)$$

Для РТД GaN/InN для каждого из участков ОДП оценки дают следующие значения частот (концентрация носителей в прилегающих к барьерам областях $n = 10^{18} \text{ см}^{-3}$; подвижность $\mu_n = 10^3 \text{ см}^2/(\text{В с})$; длина прилегающих к РТД областей $L \sim 10^{-5} \text{ см}$):

$$f_{1\max} \approx 60 \text{ ГГц};$$

$$f_{2\max} \approx 180 \text{ ГГц};$$

$$f_{3\max} \approx 400 \text{ ГГц}.$$

Основными параметрами, влияющими на частотные свойства исследованных РТД, являются концентрация, подвижность и длина прилегающих к РТД областей. Если длину прилегающих к РТД областей сделать $\sim 10^{-6} \text{ см}$, то $f_{3\max}$ будет находиться в ТГц диапазоне.

В реальных РТД из-за нерезонансного фона, неоднородности и неидентичности барьеров, емкости, сопротивления потерь максимальные ОДП, эффективности генерации и предельные частоты генерации оказываются более низкими. Однако сравнение с характеристиками, полученными для других соединений с помощью использованной методики, позволяет говорить о перспективности использования рассматриваемых РТД $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{InN}$ и РТД $\text{AlN}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ на частотах до 1 ТГц.

Выводы. Проведенные исследования показывают, что диоды на основе нитридов обладают более высокими потенциальными барьерами по сравнению с другими ранее исследованными структурами. Высота барьеров может достигать 2,4 эВ.

Используя пары $\text{AlN}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ и $\text{GaN}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, где доля x меняется от 0 до 0,5, можно получить РТД с 2, 3, 4, 5-ю уровнями в квантовой яме. Такие структуры имеют участки роста тока и следующие за ними участки ОДП, число которых соответствует числу уровней в квантовой яме.

Величина тока в максимумах ВАХ увеличивается с возрастанием номера энергетического уровня, причем при толщинах барьера 2 нм и более первые максимумы проявляются довольно слабо.

Во всех рассматриваемых РТД наибольшие эффективности генерации и мощности соответствуют наивысшему энергетическому уровню в потенциальной яме РТД. Наблюдаются зоны генерации по напряжению, каждая из которых соответствует конкретному резонансному уровню. Зоны генерации в рассмотренных РТД не перекрываются по напряжению. Максимальные частоты генерации зависят от отри-

цательной дифференциальной проводимости на каждом из участков ВАХ и соответствуют верхним уровням, а минимальные частоты – нижнему уровню в квантовой яме РТД.

1. Прохоров Э. Д. Квантово-размерные эффекты в твердотельных сверхвысокочастотных приборах: – Х.: Харьков. нац. ун-т им. В. Н. Каразина, 2005. – 220 с.
2. Maziar Farahmand, Carlo Garetto, Enrico Bellotti et al. Monte Carlo Simulation of Electron Transport in the 111-nitride wurtzite phase materials system: binaries and ternaries // IEEE Transactions on electron devices. – 2001. – 48, No. 3. – P. 535-542.
3. Schulman J. N., De Los Santos H. J., Chow D. N. Physics-Based RTD current voltage equation // IEEE Elect. Device Letters. – 1996. – 17, No. 5. – P. 220-222.
4. Боцула О. В., Прохоров Э. Д. Особенности совместной работы резонансно-туннельного диода и диода Ганна // Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2002. – 7, № 3. – С. 527-531.
5. Боцула О. В., Прохоров Э. Д. Совместная работа 2-х уровневых РТД и диода Ганна // Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2003. – 8, № 1. – С. 152-157.
6. Боцула О. В., Прохоров Э. Д., Суздальцев А. В. Резонансно-туннельные диоды на основе AlGaIn/GaN // Вестн. Харьков. нац. ун-та им. В. Н. Каразина. Радиофизика и электроника. – 2007. – № 756. – С. 105-108.

RESONANCE TUNNELLING DIODES ON ALN/AL_xGA_{1-x}N, GAN/IN_xGA_{1-x}N

O. V. Botsula, E. D. Prokhorov, I. P. Bezmal

Resonance tunnelling diodes (RTD) on the base nitrides AlN, GaN, InN have being investigated. Current-voltage characteristics of RTD with five energy levels were calculated. The current-voltage characteristics RTD was demonstrade to have five negative resistance region. The possible oscillation efficiencies for all negative resistance region was determined. The estimation of maximal oscillation frequency for each negative resistance region has been determined.

Key words: resonance tunneling diodes, efficiency oscillation, negative resistance.

РЕЗОНАНСНО-ТУНЕЛЬНІ ДІОДИ НА ОСНОВІ НІТРИДІВ AlN/Al_xGa_{1-x}N, GaN/In_xGa_{1-x}N

О. В. Боцула, Е. Д. Прохоров, І. П. Безмаль

Розглядаються резонансно-тунельні діоди (РТД) на основі подвійних і потрійних сполук нітридів AlN, GaN, InN з великою кількістю енергетичних рівнів у квантових ямах. Розраховано вольтамперні характеристики резонансно-тунельних діодів із числом рівнів у квантовій ямі до п'яти. Показано, що вольтамперні характеристики РТД можуть мати до п'яти ділянок з негативною диференційною провідністю (НДП). Визначено можливі ефективності генерації на всіх ділянках НДП. Зроблено оцінки максимальних частот генерації на кожній ділянці НДП.

Ключові слова: резонансно-тунельні діоди, ефективність генерації, негативна диференційна провідність.

Рукопись поступила 20 мая 2008 г.