

**Н. М. Гончарук, Н. Ф. Карушкин, В. А. Ореховский, В. В. Малышко**

*НИИ «Орион»*

*8а, ул. Эжена Потье, Киев, 03057, Украина*

E-mail: [ndiorion@tsua.net](mailto:ndiorion@tsua.net)

## СУБМИЛЛИМЕТРОВЫЙ ДИОД НА АРСЕНИД–ГАЛЛИЕВОЙ НАНОСТРУКТУРЕ

Рабочая частота диода субмиллиметрового диапазона на AlGaIn/GaN однобарьерной наноструктуре с нерезонансным туннелированием электронов определяется инерционностью их туннелирования через потенциальный барьер этой структуры. С целью повышения рабочей частоты исследуется аналогичный диод на AlGaAs/GaAs наноструктуре, где эффективная масса и, следовательно, инерционность туннелирования электрона меньше. Получены зависимости отрицательной проводимости (ОП) и реактанса диода от его диаметра, пролетного угла, частоты и времени туннелирования. Определены оптимальные значения диаметра и угла пролета, соответствующие максимуму ОП диода при различном времени туннелирования. Показано, что рабочая частота арсенид–галлиевого диода выше, чем таковая нитрид–галлиевого диода при одинаковых параметрах барьерного слоя. Максимальная ОП для арсенид–галлиевого диода меньше ее величины для нитрид–галлиевого диода с таким же временем туннелирования. Полученные результаты подтверждают целесообразность проведенных исследований. Ил. 7. Табл. 2. Библиогр.: 8 назв.

**Ключевые слова:** арсенид галлия, микроволновой диод, моделирование микроволновых приборов, малосигнальный импеданс диода, наноструктура, отрицательная проводимость, потенциальный барьер, туннелирование электронов.

В последнее время появляется новое поколение микроволновых приборов на основе GaN/AlGaIn наноструктур. Это обусловлено как высокой электрической и температурной стабильностью GaN и тройных соединений на его основе, так и быстрыми темпами развития технологии изготовления наноструктур на их основе. В работах [1–3] была создана и исследовалась теоретическая модель импеданса диода на однобарьерной GaN/AlGaIn наноструктуре с туннельной инжекцией электронов через AlGaIn одиночный потенциальный барьер и их дрейфом в GaN пролетном слое. Модель была создана на основе теории малосигнального импеданса [4], модифицированной в работе [5] для учета задержки туннельной инжекции электрона в резонансно-туннельном диоде. Известно, что инерционность нерезонансного туннелирования значительно больше таковой для резонансного, поэтому его учет более важен в первом случае. Исследования импеданса диода на однобарьерной GaN/AlGaIn наноструктуре показали, что максимум отрицательной проводимости (ОП) для диода с нерезонансным туннелированием имеет место на частоте, обратно пропорциональной времени задержки инжекции [1–3].

Благодаря меньшей эффективной массе электрона инерционность его туннелирования в арсениде галлия меньше, чем в нитриде галлия. Вследствие этого рабочая частота диода на однобарьерной GaAs/AlGaAs наноструктуре с туннельной инжекцией электронов через одиночный AlGaAs потенциальный барьер и дрейфом в GaAs пролетном слое должна превышать таковую для диода на GaN/AlGaIn наноструктуре. Поэтому представляет интерес исследовать ОП аналогичного диода на GaAs/AlGaAs наноструктуре. Изучаемые в настоящей работе такие нанострук-

туры с шириной слоев от 1,5 до 2,5 нм и высотой барьера в несколько десятых долей электрон-вольта экспериментально реализуемы при современном уровне развития их технологии. Время туннелирования электрона через AlGaAs потенциальный барьер в них составляет десятые доли пикосекунды и соответствует рабочей частоте диода в субмиллиметровом диапазоне длин волн [6, 7].

**1. Модель инжекционных характеристик и микроволнового импеданса диода.** Нами исследуется микроволновой импеданс диода, состоящего из GaAs эмиттерного слоя, AlGaAs слоя потенциального барьера и GaAs слоя дрейфа электронов. Потенциальный барьер образуется на границах раздела барьерного слоя с эмиттерным и с дрейфовым слоями из-за различия в смежных слоях как энергии сродства электрона, так и его энергии Ферми.

Энергетическая диаграмма зоны проводимости в активных слоях диода при наличии отличного от нуля электрического поля показана на рис. 1. Здесь  $x$  – координата в направлении туннелирования и дрейфа электрона,  $b$  и  $d$  – ширина слоев потенциального барьера и дрейфового соответственно,  $\phi_0$  и  $\phi$  – высота потенциального барьера при нулевых и ненулевых значениях электрического поля и энергии электрона,  $E_c$  – энергия дна зоны проводимости эмиттера,  $E$  – компонента энергии электрона в направлении, перпендикулярном эмиттирующей поверхности. Постоянные во времени инжекционные характеристики диода вычислялись, как и в работе [1], в простом приближении, используемом при исследовании верхнего частотного предела области ОП резонансно-туннельного диода [8]. В этом приближении время туннелирования электрона через потенциальный барьер равно произведению удельных емкости барьерного слоя и туннельного

сопротивления. Последнее определяется как величина, обратная производной плотности тока по напряжению. При принятом предположении, что постоянное во времени электрическое поле в барьерном и пролетном слоях диода не зависят от координаты, время туннелирования  $\tau_b = \varepsilon_0 \varepsilon_d / \sigma$ . Здесь  $\varepsilon_d$  – относительная диэлектрическая проницаемость пролетного слоя,  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума,  $\sigma$  – дифференциальная инжекционная проводимость диода, равная производной от плотности тока по электрическому полю в пролетном слое.

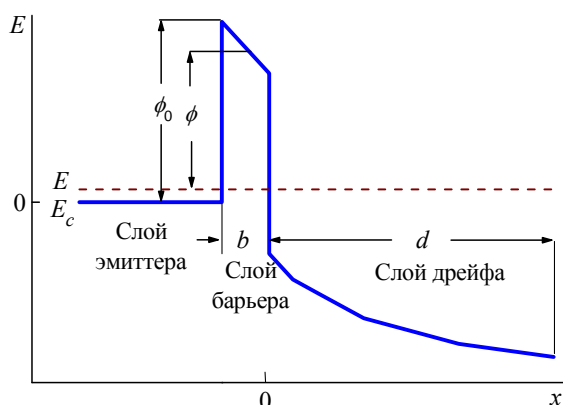


Рис. 1. Профиль энергии зоны проводимости в слоях диода

Для исследования микроволнового импеданса диода использовалась модель малосигнального импеданса [1, 4], являющаяся модификацией малосигнальной теории Зи [2]. В используемой нами модели, в отличие от представленной в работе [2], учитывается задержка фазы электронной

волны при туннелировании электрона наряду с таковой при его дрейфе, как и в работе [3] для резонансно-туннельного диода. Уравнения этой модели изложены в статье [1], поэтому они здесь не приводятся.

**2. Результаты расчета инжекционных характеристик.** Вычисления проводились для диодов с углом пролета электрона в дрейфовом слое от 0 до  $2\pi$  и диаметром от 1 мкм до верхнего предела диаметра, при котором для диода с данными параметрами барьера ОП исчезает. Скорость дрейфа электронов предполагалась равной  $10^7$  см/с; уровень легирования эмиттерного и дрейфового слоев  $5 \cdot 10^{18}$  и  $10^{18}$  см<sup>3</sup>. Паразитное сопротивление диода вычислялось при специфическом сопротивлении контакта равном  $10^{-7}$  Ом·см<sup>2</sup> [3], ширине эпитаксиальных слоев 250 нм, удельном сопротивлении диодного чипа  $10^{-3}$  Ом·см, его высоте и диаметре 50 и 100 мкм соответственно.

В табл. 1 приведены параметры барьерного слоя диодов, микроволновой импеданс которых исследовался в рамках малосигнальной модели, и рассчитанные их инжекционные характеристики, такие как плотность независимого от времени тока диода и время туннелирования электрона при данных параметрах барьерного слоя. При расчетах параметров барьерного слоя, таких как высота барьера и эффективная масса электрона, в этом слое предполагалась их пропорциональная зависимость от доли Al в слое. Ширина барьерного слоя в первых четырех диодах одинакова, а высота уменьшается при увеличении номера диода. Для следующих диодов различаются как ширина, так и высота барьерного слоя.

Таблица 1

Параметры, инжекционные и микроволновые характеристики диодов

Параметры диода			Характеристики инжекции		Микроволновая характеристика
Номер диода	Ширина барьера, нм	Высота барьера, эВ	Время инжекции, пс	Плотность тока, $10^2$ кА/см	Оптимальный диаметр, мкм
1	2,5	0,3	0,92	3,80	25
2	2,5	0,25	0,73	4,36	18
3	2,5	0,2	0,57	4,97	12
4	2,5	0,15	0,43	5,50	8
5	2,0	0,5	0,27	14,0	4
6	1,5	0,4	0,275	41,9	3
7	2,0	0,3	0,45	12,2	10

Анализ данных табл. 1 показывает, что инжекционные характеристики диодов, такие как время задержки туннельной инжекции и плотность постоянного тока, сильнее зависят от ширины, чем от высоты потенциального барьера. Высота барьера для шестого диода в 2,6 раза больше, чем для пятого, а для седьмого в 2 раза больше, чем для четвертого. Несмотря на это,

плотность постоянного тока шестого диода меньше, чем пятого, а седьмого меньше, чем четвертого, из-за большей ширины барьера лишь на 20–25 %.

К уменьшению времени задержки инжекции в два раза приводит либо понижение барьера в два раза (диоды 1 и 4), либо уменьшение его ширины на пятую часть (диоды 1 и 7).

Время задержки инжекции электрона для исследуемых диодов находится в интервале 0,3...0,9 пс. Оно уменьшается при уменьшении как ширины, так и высоты потенциального барьера, сопровождаемом увеличением его прозрачности. Параметры диода и полученная из расчетов величина времени задержки инжекции электронов являются параметрами в модели малосигнального импеданса.

Для седьмого арсенид-галлиевого диода время задержки инжекции электрона в 1,6 раза меньше, а ток больше, чем те же характеристики для третьего нитрид-галлиевого диода с одинаковыми параметрами барьера [1]. Это обусловлено меньшей эффективной массой электронов в AlGaAs, чем в AlGaIn.

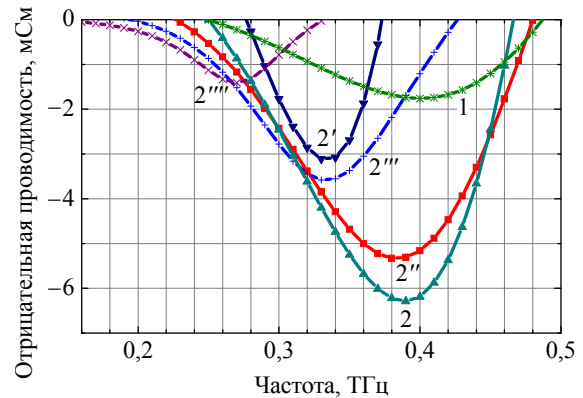
**3. Результаты расчета микроволнового импеданса диода.** Зависимости ОП первого диода от частоты и зависимости его адмиттанса, рассчитанные при различных значениях диаметра диода и пролетного угла, приведены на рис. 2 и 3. Их анализ показывает наличие оптимальных значений угла пролета и диаметра, соответствующих наибольшей величине ОП диода с данными параметрами барьера.

Зависимости 2–2'''' на рис. 2, а и 1–8 на рис. 2, б получены при диаметре 2 мкм и различных значениях угла пролета в интервале, соответствующем наличию ОП диода с данным диаметром. Зависимости 1–8 на рис. 2, б получены при оптимальном диаметре 25 мкм и различных значениях угла пролета.

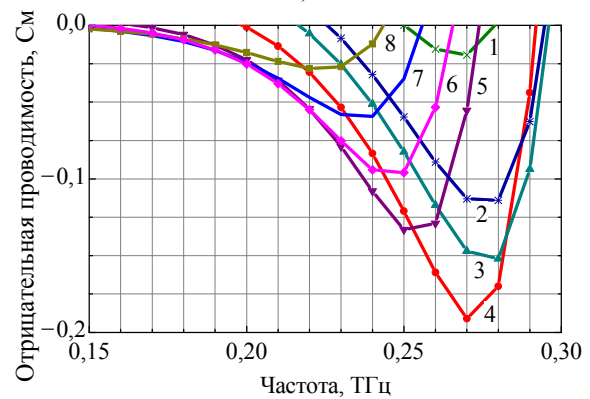
Их анализ показывает, что при любом диаметре диода величина и частота пика ОП и верхняя граница ее полосы частот увеличиваются, когда угол пролета увеличивается от его значения, минимального для наличия ОП, до оптимального значения угла пролета. Достигнув максимума при оптимальном угле пролета (кривые 2 и 4 на рис. 2), они уменьшаются при дальнейшем его увеличении. ОП диода исчезает полностью при достижении угла пролета, максимального из его значений, соответствующих ОП. Минимальный, оптимальный и максимальный углы пролета зависят как от параметров барьерного слоя, так и от диаметра диода. Для первого диода с наибольшим временем задержки инжекции минимальное, оптимальное и максимальное значения пролетного угла при микронном диаметре близки соответственно к 0, 0,3π и 2π.

Увеличение диаметра диода приводит к сужению интервала углов пролета, соответствующих ОП, за счет повышения его нижней границы и понижения верхней. Как это видно из приведенных в табл. 2 данных, оптимальный угол пролета при этом увеличивается, стремясь к 1,3π

при приближении диаметра к его верхнему пределу, выше которого ОП отсутствует.



а)



б)

Рис. 2. ОП первого диода: а) при диаметре 1 и 2 мкм и оптимальном угле пролета 0,3π (кривые 1, 2), диаметре 2 мкм и угле пролета 0,1π, 0,5π, π, 1,5π (кривые 2'–2'''''); б) при оптимальном диаметре 25 мкм и угле пролета 0,6π, 0,8π, 0,9π, 1,1π, 1,4π, 1,5π, 1,6π, 1,7π (кривые 1–8)

Кривые 1–8 на рис. 2, а и 3, а получены при указанных в табл. 2 различных значениях диаметра диода и пролетном угле, оптимальном при данном диаметре. Величина и частота максимального пика ОП, достигаемого при оптимальном угле пролета, и ширина полосы частот ОП зависят от диаметра диода. При увеличении диаметра диода частота максимального пика, достигаемого при оптимальном для данного диаметра угле пролета, понижается, а полоса частот ОП сужается и полностью исчезает при диаметре, равном его верхнему пределу (кривые 1–8 на рис. 2, а; 3, а).

Величина пика ОП для диода с данным диаметром и оптимальным углом имеет наибольшую величину при оптимальном диаметре диода и соответствующем этому диаметру оптимальном угле пролета. Зависимость 4 на рис. 2, б или 5 на рис. 3, а получена при оптимальных для первого диода значениях как диаметра, так и пролетного угла.

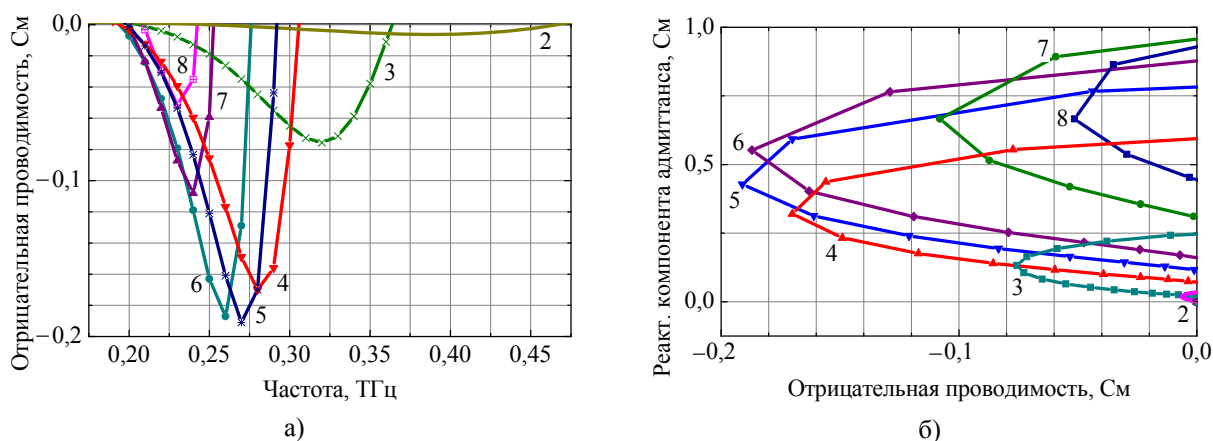


Рис. 3. ОП (а) и адмиттанс (б) первого диода при различных значениях его диаметра и угла пролета оптимального для данного диаметра (табл. 2)

Таблица 2

Оптимальный угол пролета при различных значениях диаметра диода

Номер кривой	Первый диод		Пятый диод		Седьмой диод	
	Диаметр диода, мкм	Оптимальный угол пролета, $\pi$	Диаметр диода, мкм	Оптимальный угол пролета, $\pi$	Диаметр диода, мкм	Оптимальный угол пролета, $\pi$
1	1	0,3	1	1,0	2,5	1,1
2	2	0,3	1	1,1	5	1,1
3	10	1,0	2	1,1	8	1,1
4	20	1,1	4	1,2	10	1,2
5	25	1,1	5	1,2	12	1,2
6	30	1,2	6	1,3	14	1,3
7	40	1,3	–	–	–	–
8	45	1,3	–	–	–	–

Оптимальное значение диаметра диода определяется параметрами барьерного слоя и паразитного сопротивления контактов [1]. Оно тем больше, чем меньше проницаемость барьера (см. табл. 1) и сопротивление растекания контакта [1]. Оптимальная величина диаметра и верхний предел интервала его значений, соответствующих ОП первого диода, близки к 25 и 50 мкм, а оптимальный угол пролета, соответствующий максимальному пику при оптимальном диаметре, равен  $1,1\pi$  (см. табл. 1 и 2).

Когда диаметр первого диода увеличивается от 1 мкм до его верхнего предела, оптимальный угол пролета при данном диаметре увеличивается от  $0,3\pi$  до  $1,3\pi$  (табл. 2). Суммарный угол задержки электрона возрастает от  $\pi$  до  $1,75\pi$ . При этом угол задержки инжекции на частоте максимального пика уменьшается вследствие понижения частоты пика. При диаметре микронном, оптимальном и близком к его верхнему пределу, угол задержки инжекции электрона составляет соответственно 0,7; 0,3 и 0,2 суммарного угла задержки. Из этого следует, что в полосе

частот ОП диода оба угла задержки инжекции и пролета сравнимы. Для первого диода с оптимальными диаметром и углом пролета отношение последнего к углу задержки инжекции близко к 2,3 на частоте максимального пика его ОП.

Из анализа представленных на рис. 3, б зависимостей следует, что реактивная компонента адмиттанса первого диода с оптимальными диаметром и углом пролета вдвое больше активной его компоненты на частоте максимального пика ОП. Их отношение увеличивается с увеличением диаметра диода.

Анализ частотных зависимостей отрицательного сопротивления первого диода на рис. 4 и сравнение их с аналогичными зависимостями его ОП (кривые 1–8 на рис. 2, а и 3, а), полученными при таких же параметрах диода, показывает следующее. При увеличении диаметра диода величина пика отрицательного сопротивления уменьшается, а его частота понижается. Однако зависимость частоты пика отрицательного сопротивления от диаметра значительно слабее аналогичной зависимости частоты пика ОП. Частота пика

ОП тем больше превышает частоту пика отрицательного сопротивления, чем меньше диаметр диода. Она приближается к последней при приближении диаметра к своему верхнему пределу.

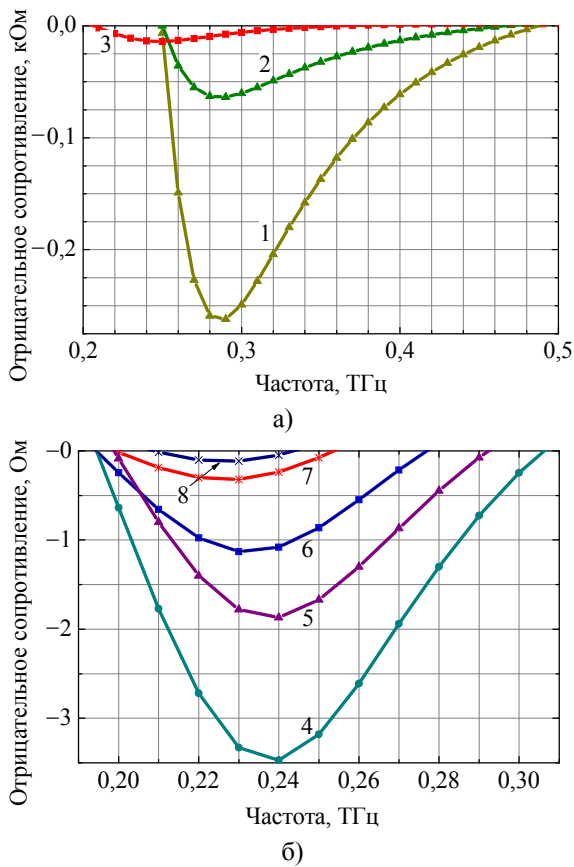


Рис. 4. Отрицательное сопротивление первого диода при указанных в табл. 2 значениях его диаметра и угла пролета, оптимального для данного диаметра

Представленные на рис. 5 частотные зависимости ОП и адмиттанс пятого диода с наименьшим временем туннелирования получены при приведенных в табл. 2 значениях диаметра диода и пролетного угла, оптимального для данного диаметра. Рабочая частота этого диода и ширина полосы частот ОП наибольшие среди таковых для остальных диодов в табл. 1. Величина наибольшего пика ОП, оптимальный диаметр и интервалы значений диаметра и угла пролета, при которых проводимость этого диода отрицательна, наименьшие среди таковых для остальных диодов. Оптимальный диаметр и соответствующий ему оптимальный угол пролета для пятого диода близки к 4 мкм и  $1,2\pi$ , а верхний предел диаметра к 6,5 мкм.

Отношение компонент адмиттанса пятого диода, реактивной к активной, на частоте максимального пика ОП близко к трем (кривая 4 на рис. 5, б).

Выше было указано, что параметры барьерного слоя seventh диода, частотные зависимости ОП и адмиттанс которого приведены на рис. 6,

совпадают с таковыми полученными для исследуемого в работе [1] второго нитрид-галлиевого диода. Однако время задержки инжекции seventh арсенид-галлиевого диода в 1,6 раза меньше его величины для второго нитрид-галлиевого диода из-за меньшей эффективной массы туннелирующего электрона в первом диоде. Поэтому частота наибольшего максимума ОП этого диода во столько же раз выше таковой для второго нитрид-галлиевого диода [1].

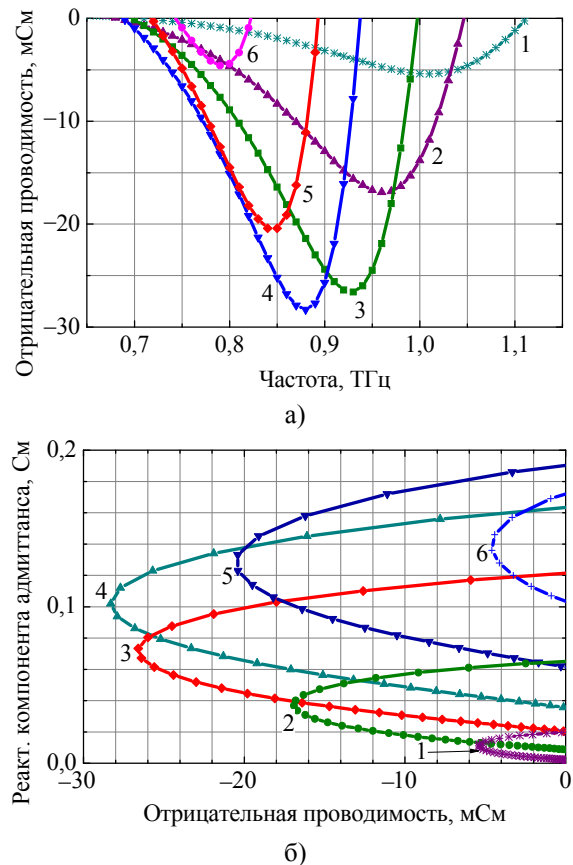


Рис. 5. ОП (а) и адмиттанс (б) пятого диода при указанных в табл. 2 значениях диаметра диода и оптимального при данном диаметре угла пролета

Сравнивая частотные зависимости ОП seventh арсенид-галлиевого (кривая 3 на рис. 6) и первого нитрид-галлиевого (кривая 12 на рис. 7, б в работе [1]) диодов, полученные при оптимальных значениях диаметра и угла пролета, можно заключить следующее. Величина наибольшего пика ОП seventh арсенид-галлиевого диода близка к таковой для первого нитрид-галлиевого [1], а частота этого пика ниже из-за большего на 25 % времени задержки инжекции для seventh арсенид-галлиевого диода. Так как величина пика уменьшается при уменьшении времени инжекции, то при одинаковом времени инжекции обеих диодов она будет меньше для диода на арсенид-галлиевой наноструктуре.

Сравнение приведенных на рис. 2, б; 4, б и 5, б, зависимостей адмиттанса первого, пятого и

седьмого из исследуемых диодов показывает, что отношение реактивной компоненты адмиттанса к активной на частоте максимального пика ОП больше и, следовательно, условия согласования импеданса диода и микроволновой нагрузки хуже при меньшем времени инжекции. Это обусловлено большей величиной холодной емкости пролетного слоя диодов с меньшим временем туннелирования.

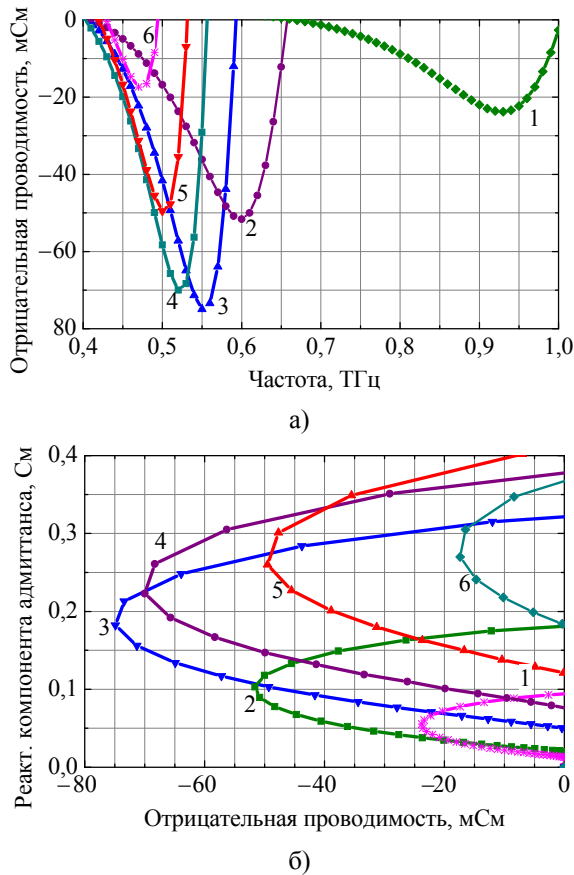


Рис. 6. ОП (а) и адмиттанс (б) седьмого диода при указанных в табл. 2 значениях диаметра и оптимальном при данном диаметре угле пролета

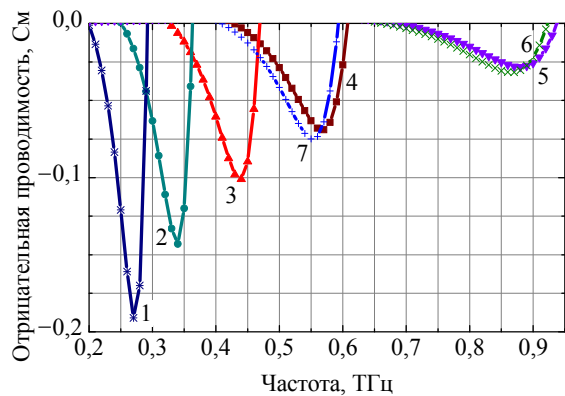


Рис. 7. ОП всех исследуемых диодов (номер диода и кривой совпадают) с оптимальными диаметром диода и углом пролета (табл. 1)

При уменьшении времени задержки инжекции диода интервал углов пролета, при которых проводимость диода отрицательна, сужается за счет повышения и приближения его верхней границы к оптимальному углу пролета (кривые на рис. 2, а; 4, а и 5). Величина последнего близка к  $1,2\pi$  для пятого и шестого диодов с наименьшими значениями времени задержки инжекции и  $1,1\pi$  для остальных диодов.

На частоте максимального пика ОП любого из исследуемых диодов с оптимальным как диаметром, так и углом пролета значения углов задержки пролета, инжекции и суммарного близки к  $1,1\pi$ ,  $0,5\pi$  и  $1,6\pi$ , соответственно. Отсюда следует, что для исследуемого диода с любыми параметрами барьерного слоя отношение оптимального времени пролета электрона к времени задержки его инжекции близко к 2,2.

Частотные зависимости ОП всех исследуемых диодов с различной величиной времени задержки инжекции при оптимальных величинах диаметра и угла пролета показаны на рис. 7. Для диода с меньшим временем задержки инжекции электрона величина максимального пика ОП меньше, частота этого пика выше, а полоса частот ОП шире. Частота наибольшего пика ОП, являющаяся оптимальной рабочей частотой диода, близка к обратной величине учетверенного времени инжекции  $f_m = (4\tau_b)^{-1}$ . Это следует из указанных выше условий для оптимальных значений угла пролета  $\theta_{opt} = 1,1\pi$  и угла задержки инжекции  $\varphi(f_m) = \theta_{opt} / 2,2$  на частоте наибольшего пика ОП  $f_m$ .

Несмотря на различие параметров барьера для пятого и шестого или четвертого и седьмого диодов, частотные зависимости ОП для них близки (кривые 5 и 6 или 4 и 7 на рис. 7) из-за близких значений времени туннелирования для них (см. табл. 1).

При оптимальных диаметре диода и угле пролета ширина пролетного слоя  $d = v\tau_{opt}$ , где  $v$  – скорость дрейфа электрона пролетном слое,  $\tau_{opt}$  – оптимальное время пролета. Для первого, седьмого и пятого диодов ее величина близка к 200, 100 и 68 нм соответственно. Уменьшение оптимальной ширины пролетного слоя при уменьшении времени задержки инжекции электрона обусловлено повышением рабочей частоты диода, так как оптимальный угол пролета близок к  $1,1\pi - 1,2\pi$  для всех диодов с оптимальным диаметром.

**Выводы.** Таким образом, для диода с определенными параметрами барьерного слоя максимальная ОП имеет место на четвертой субгармонике частоты туннельной инжекции, при оптимальных диаметре диода и угле пролета в интервале от  $1,1\pi$  до  $1,2\pi$ . Максимальная ОП, оптимальный диаметр диода и интервалы значений

диаметра и угла пролета, соответствующих ОП, меньше для диода с меньшим временем задержки инжекции.

#### Библиографический список

1. *Goncharuk N. M. Single-Barrier Diode with Tunnel Injection / N. M. Goncharuk // 11<sup>th</sup> Intern. Symp. RF MEMS and RF Microsystems: proc. – Otranto, 2010. – P. 8.*
2. *Гончарук Н. М. Субмиллиметровый диод на основе однобарьерной наноструктуры / Н. М. Гончарук // 20-я Междунар. Крымская конф. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2010): тез. докл. – Севастополь, 2010. – С. 838–839.*
3. *Нитрид-галлиевый диод с туннельной инжекцией / Н. М. Гончарук, Н. Ф. Карушкин, В. А. Ореховский, В. В. Малышко // Радиофизика и электрон. – 2013. – 4(18), № 3. – С. 69–78.*
4. *Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов: в 2-х кн. Кн. 2 / С. М. Зи; пер. с англ. под ред. Р. А. Сурица. – М.: Мир, 1984. – 456 с.*
5. *Oscillations up to 420 GHz in GaAs/AlAs Resonant Tunneling Diodes / E. R. Brown, T. C. L. G. Solner, C. D. Parker et al. // Appl. Phys. Lett. – 1989. – 55, iss. 17. – P. 1777–1779.*
6. *Гончарук Н. М. Арсенид-галлиевый наноструктурный диод с нерезонансным тунелированием / Н. М. Гончарук, Н. Ф. Карушкин // 22-я Междунар. Крымская конф. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2012): тез. докл. – Севастополь, 2012. – С. 717–718.*
7. *Goncharuk N. M. Submillimeter Diode on Single Barrier Nanostructure / N. M. Goncharuk // 1<sup>st</sup> IEEE MTT-S Intern. Wireless Symp. (IWS2013). – Beijing, 2013.*
8. *Luryi S. Frequency limit of double-barrier resonant-tunneling diodes / S. Luryi // Appl. Phys. Lett. – 1985. 47, iss. 5. – P. 490–492.*

*Рукопись поступила 06.08.2013.*

N. M. Goncharuk, N. F. Karushkin,  
V. A. Orehovskiy, V. V. Malyshko

#### SUBMILLIMETER DIODE ON GALLIUM ARSENIDE NANOSTRUCTURE

Operating frequency of submillimeter wave range diode on AlGaIn/GaN one-barrier nanostructure with nonresonant

tunnelling of electrons is determined by an inertia of electron tunneling under potential barrier of the structure. With the aim to increase the operating frequency in the present work the same diode on AlGaAs/GaAs nanostructure is investigated, where effective mass and, hence, tunneling inertia of electron is less. Dependences of negative conductance and a reactance of the diode on its diameter, transit angle, frequency and tunneling time have been obtained. Optimal values of diode diameter and transit angle, which correspond to maximal negative conductance of the diode with different tunneling time, have been determined. It has been shown that operating frequency of gallium arsenide diode is one and a half more than the same of gallium nitride diode with equal parameters of a barrier layer. Maximal negative conductance of gallium arsenide diode is less than its value for gallium nitride diode with the same tunnelling time. The expediency of the investigations is confirmed by the obtained results.

**Key words:** gallium arsenide, microwave diode modeling, small-signal impedance, nanostructure, negative conductance, potential barrier, electron tunneling.

Н. М. Гончарук, Н. Ф. Карушкин,  
В. А. Ореховский, В. В. Малышко

#### СУБМІЛІМЕТРОВИЙ ДІОД НА АРСЕНІД-ГАЛІЄВІЙ НАНОСТРУКТУРІ

Робоча частота діода субміліметрового діапазону на AlGaIn/GaN однобар'єрній наноструктурі з нерезонансним тунелюванням електронів визначається інерційністю їх тунелювання через потенційний бар'єр цієї структури. З метою підвищення цієї частоти вивчається імпеданс аналогічного діода на AlGaAs/GaAs наноструктурі, де ефективна маса електрона, а отже й інерційність його тунелювання менші. Отримано залежності від'ємної провідності та реактанса діода від його діаметра, пролітного кута, частоти та часу тунелювання. Визначено оптимальні значення діаметра та пролітного кута, які відповідають максимуму від'ємної провідності діода при різній величині часу тунелювання. Показано, що робоча частота арсенид-галієвого діода вища, ніж така нітрид-галієвого діода при однакових параметрах бар'єрного шару. Максимальна від'ємна провідність арсенид-галієвого діода менша її величини для нітрид-галієвого з таким же часом тунелювання. Отримані результати підтверджують доцільність проведених досліджень.

**Ключові слова:** арсенид галія, моделювання мікрохвильових діодів, малосигнальний імпеданс діода, наноструктура, від'ємна провідність, потенційний бар'єр, тунелювання електронів.