

Some systems of differential equations with generalized coefficients are investigated in the algebra of mnemofunctions. The associated solutions of such systems of differential equations are obtained.

УДК 535:621.373.8

Тарасюк Н. П., Ворсин Н. Н., Луценко Е. В., Гладыщук А. А.

ВЛИЯНИЕ КОНТАКТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ НА ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕМТ-ТРАНЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ GaN

Введение. Создание металлических контактов для полевых AlGaIn/GaN-транзисторов является одним из ключевых моментов в создании этих приборов. Для стока и истока требуются омические (невыпрямляющие) контакты, для затвора – выпрямляющий контакт – барьер Шоттки к n-GaN или n-AlGaIn.

Как известно, для образования омического контакта необходимо либо отсутствие потенциального барьера на границе металл – полупроводник, либо наличие низкого барьера, легко преодолеваемого носителями тока за счет тепловой энергии, или же барьер должен быть прозрачен для туннелирования электронов [1]. Возможна также комбинация этих механизмов (термополевая эмиссия). Удовлетворение этим условиям достигается подбором материалов омического контакта, а также различными путями изменения химического состава приповерхностной области полупроводника.

Высота барьера Шоттки Φ_{bW} для идеального выхода металла Φ_M и электронным средством полупроводника χ_s : $\Phi_{bW} = \Phi_M - \chi_s$ для получения полупроводника n-типа. GaN при 300 К имеет $\chi_s = 4,2$ В.

Реальные значения высот барьеров Шоттки довольно сильно отличаются от их значений для идеальных контактов. Такое несоответствие, как известно, связано с влиянием поверхностных состояний на границе раздела. Тем не менее для нитридов III группы как для полупроводников с преимущественной ионной связью следует ожидать выполнения данного соотношения.

В таблице 1 приведены идеальные и экспериментальные значения барьеров Шоттки. Видна тенденция к выполнению подобного соотношения.

Таблица 1 – Высота барьеров Шоттки для GaN

Металл	Работа выхода из металла, эВ	Высота барьера Шоттки n-GaN, эВ	
		Расчет	Эксперимент
Al	4,08		
Ti	4,33	0,23	0,10 – 0,60
Au	5,10	1,00	0,84 – 1,15
Pd	5,12	1,02	0,91 – 1,24
Ni	5,15	1,05	0,66 – 0,99
Pt	5,65	1,55	1,03 – 1,27

Разброс в значениях Φ_{bW} может быть обусловлен разными причинами: присутствием окисла, локальными нарушениями стехиометрии поверхности, ее различной морфологией (шероховатостью) и т. п. Для GaN плотность поверхностных состояний составляет $1,77 \cdot 10^{13} \text{см}^{-2} \text{эВ}^{-1}$.

При создании омических контактов используют контакт Шоттки с низким барьером. Основным требованием к контактам полевого транзистора является минимальное сопротивление истока и стока, определяющее потери, саморазогрев и предельные частоты прибора.

Омический контакт к n-GaN (AlGaIn) обычно состоит из многослойной металлической композиции. Тонкие слои металлов напыляются последовательно один на другой. Затем проводится кратковременный (30 сек) высокотемпературный отжиг в атмосфере азота.

Металл нижнего слоя образует основной контакт с полупроводником. Заметим, что GaN (AlGaIn) включает в себя летучую компоненту – азот. Созданный поверх полупроводника слой служит диффузионным барьером, препятствующим выходу атомов из полупроводника. Верхний слой защищает контакт от воздействия среды и обеспечивает присоединение электродов.

Наиболее подходящей парой металлов для омических контактов являются Ti и Al. Для n-GaN используют Ti/Al с отжигом при 900°C в течение 30 с. При такой температуре происходит разложение GaN и образуется соединение TiN. У поверхности накапливаются вакансии азота, являющиеся донорами в GaN. Приповерхностный слой становится сильнолегированным и обеспечивает туннельное проникновение через контакт. Соединение TiN имеет относительно небольшую работу выхода 3,74 эВ и способствует образованию контакта к n-GaN. Титан (Ti) обладает низкими диффузионными качествами. Слой Al служит диффузионным барьером. На поверхности возникает фаза Al₃Ti, которая стабильна и устойчива к окислению.

Очевидно, что омические контакты стока и истока должны осуществляться не с барьерным слоем AlGaIn, а с двумерным электронным газом, находящимся под барьерным слоем. Стандартная металлизация осуществляется электронно-лучевым напылением Ti (30 нм)/Al (70 нм) с последующим отжигом при 900°C в течение 30 с. В процессе отжига формируется металлический слой AlTi₂N с обедненной азотом областью в приповерхностной части AlGaIn-слоя. В такой схеме все 70 нм Al реагирует с 25 нм Ti с образованием Al₃Ti. Остается 5 нм Ti для реакции с AlGaIn. В этом случае значительная часть слоя AlGaIn остается непрореагировавшей с Ti и доступ электронов к нижнему слою n-GaN оказывается затрудненным. Оставшийся слой AlGaIn является препятствием для туннелирования носителей, поскольку в нем расположен широкий и высокий барьер.

Для уменьшения сопротивления ρ_s ОК следует уменьшать толщину непрореагировавшего с Ti слоя AlGaIn. Это позволяет сделать так называемая «продвинутая схема» Ti-металлизации с иными толщинами Ti (150 нм)/Al (20 нм). В этом случае образуется фаза Ti₃Al, оставляя 85 нм Ti для реакции со слоем AlGaIn, и формируется фаза AlTi₂N. Реакция происходит по всей толщине слоя AlGaIn и собственно слоя AlGaIn в области контакта не остается.

Воспроизводимости и уменьшению сопротивления омических контактов способствует имплантация Si перед металлизацией для повышения концентрации электронов в тонком приповерхностном слое, что облегчает туннелирование носителей сквозь барьер контакта. Имплантацию Si проводят в сочетании с последующим отжигом при 1150°C в течение 30 с для активации внедренного Si. Сочетание имплантации Si (40 кэВ) и продвинутой схемы Ti-металлизации для AlGaIn/GaN-структур с толщиной верхнего слоя AlGaIn 34 нм обеспечивает значительное снижение сопротивления контакта до значений контактного сопротивления $R_K = 0,25$ Ом и удельного контактного сопротивления на границе раздела металл – полупроводник $\rho_s = 5,6 \cdot 10^{-6} \text{Ом см}^2$. Ti-металлизация имеет свои преимущества и недостатки, в частности шероховатость поверхности готовых контактов.

Тарасюк Николай Петрович, старший преподаватель кафедры физики Брестского государственного технического университета.

Ворсин Николай Николаевич, к. физ.-мат. н., доцент кафедры физики Брестского государственного технического университета.

Гладыщук Анатолий Антонович, к. физ.-мат. н., профессор кафедры физики Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Луценко Евгений Викторович, к. ф.-м.н., ст. научный сотрудник Института физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси.

Беларусь, 220072, г. Минск, пр. Независимости, 68.

Многими разработчиками успешно используются несколько иные схемы Ti/Al-металлизации: Ti/Al/Ni/Au, Ti/Al/Pt/Au, Ti/Al/Ti/Au. Применение системы Ti (20 нм)/Al (20 нм)/N (40 нм)/Au (40 нм) с температурой вжигания 830°C в течение 30 с позволяет получить $\rho_s = 7,7 \cdot 10^{-7}$ Ом см².

Сочетание металлизации Ti (20 нм)/Al(80 нм)/Pt(40 нм)/Au (150 нм) и стандартного вжигания в атмосфере азота при 900°C в течение 30 с позволяет получить $\rho_s = 5,38 \cdot 10^{-7}$ Ом см². Покрытие Pt добавлено для совместимости Al-металлизации с Au-металлизацией и для защиты Al при вжигании контактов.

Удивительный эффект дает предварительное химическое травление поверхности AlGaIn в растворе K₂S₂O₈: KOH под УФ-освещением с длиной волны $\lambda=254$ нм. Контактное сопротивление уменьшается в два раза [2]. Ни предварительный отжиг, ни сухое травление такого эффекта не дают.

Температурно-стабильные омические контакты к Al_{0,15}GaN изготовлены при применении системы Ti (10 нм)/Al (50 нм)/Ti (25 нм)/Au (30 нм)/WSiN (120 нм). Термостабильность этой композиции определяется стойкостью WSiN – диффузионного барьера и превышает 800°C, т. е. близка к температуре диссоциации GaN [3].

Необходимость операции высокотемпературного отжига контактов не способствует достижению предельно высоких характеристик HEMT, поскольку температура отжига близка к температуре диссоциации GaN. Попытки понизить температуру отжига, в основном, связаны с заменой в нижнем слое металлизации Ti на Si [4]. Это позволяет уменьшить температуру отжига до 650°C с получением хорошей величины удельного сопротивления контактов – около 1 Ом*мм (При толщине барьерного слоя 30 нм – это даст $\rho_s = 3 \cdot 10^{-7}$ Ом см²).

Для создания выпрямляющего контакта к n-GaN и p-AlGaIn, т. е. затвора Шоттки, используется металл с большой работой выхода, в частности Pt или Ni. Известно, что значения высот барьеров для AlGaIn выше, чем для GaN, а степень закрепления уровня Ферми у границы раздела меньше. Например, высота барьера для Ni на p-Al_{0,15}GaN составила 1,26 эВ.

Здесь также применяются двух- и трехслойные композиции металлов, в том числе Pt/Ti/Au. Важной проблемой для барьеров Шоттки является их термостабильность. Использование силицидов Pt и Ni увеличивает термическую стабильность барьеров. Однако силициды не образуют термодинамически равновесных композиций с GaN, что создает опасность деградации контактов с образованием соединений Me-Ga и Si-N. Видимо, проблема создания надежных и воспроизводимых контактов еще не решена.

1. Влияние контактных сопротивлений на статические характеристики HEMT. Считаем, что реальный транзистор представляет собой внутренний транзистор, к которому присоединены через контактные сопротивления выводы стока, истока и затвора. На рисунке 1 выделен пунктиром внутренний транзистор и внешние контакты. Зазоры между контактом затвора и контактами стока и истока обозначены через l . В такой модели выводы стока и истока имеют распределенный контакт с двумерным газом (ДЭГ) и отделены от внутреннего транзистора пространством двумерного газа длиной l .

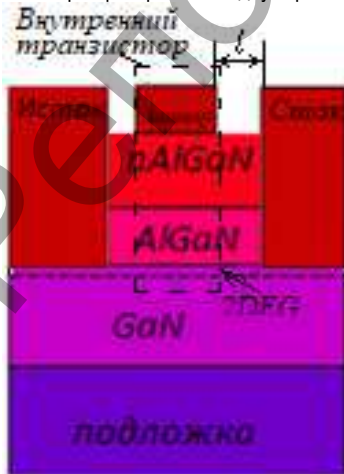


Рисунок 1 – Модель транзистора с минимальным количеством выделенных слоев

На рисунке 2 показана топология реального транзистора с секционированным затвором. Видно, что между контактами затвора (узкие светлые горизонтальные полоски) и истока с одной стороны и стока – с другой имеются зазоры. Величина зазоров не велика, около 1 мкм, но вносимое ими сопротивление оказывается заметным на фоне сопротивления выводов. Следовательно, сопротивления выводов складываются из распределенного по площади контактного сопротивления и дополнительного сопротивления зазора, которое не может считаться бесконечно малым ввиду конечной концентрации электронов и их подвижности в ДЭГ.

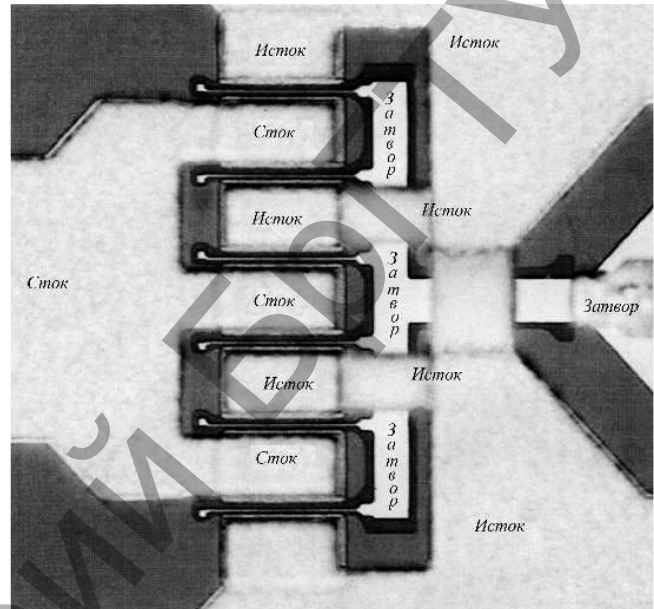


Рисунок 2 – Топология реального транзистора с секционированным затвором

Действительно, при средних величинах концентрации $n \approx 10^{13}$ 1/см³ и подвижности $\mu \approx 1500$ см²/(В*с) величина удельного сопротивления ДЭГ составит около 300–400 Ом/мм. Задавшись величиной зазора $l \approx 1$ мкм и средней шириной затвора ≈ 500 мкм, получим сопротивление зазора $r_z \approx 0,8$ Ом, что не является пренебрежимо малой величиной.

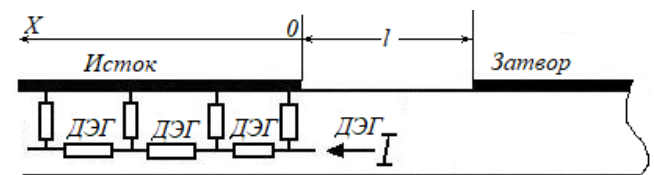


Рисунок 3 – Представление распределения сопротивления контактов через погонные сопротивления ДЭГ

Вычисление распределенного сопротивления контактов можно выполнить по аналогии длинной линией передач, заменив в телеграфных уравнениях распределенный индуктивный и емкостной импеданс линии на распределенные сопротивления, показанные на рисунке 3. Падения напряжения и тока на участке контакта dx выражаются через погонные сопротивления ДЭГ и проводимость контактов:

$$dU(x) = -I(x) \cdot R_n; \quad (1)$$

$$dI(x) = -U(x) \cdot G_n. \quad (2)$$

С учетом граничных условий $I(0)=I_u$, $I(\infty)=0$ получим:

$$U(x) = I_u \sqrt{\frac{R_n}{G_n}} \exp(-x\sqrt{R_n G_n}); \quad (3)$$

$$I(x) = I_u \exp(-x\sqrt{R_n G_n}). \quad (4)$$

На обращенном к затвору краю контакта $x=0$, и мы получим для величины контактного сопротивления следующую формулу:

$$r_k = \frac{U(0)}{I(0)} = \sqrt{\frac{R_n}{G_n}}. \quad (5)$$

Погонное сопротивление ДЭГ $R_n = \rho_{\text{дэз}}/a$, где a – ширина под-контактной области – ширина затвора. Погонная проводимость контакта также выражается через ширину затвора: $G_n = a/\rho_s$. В результате контактное сопротивление будет равно:

$$r_k = \sqrt{\frac{R_n}{G_n}} = \sqrt{\frac{\rho_{\text{дэз}}\rho_s}{a}}. \quad (6)$$

Общее сопротивление между электродом стока или истока внутреннего транзистора и внешним выводом выразится следующей формулой:

$$R_{\text{общ}} = \frac{\rho_{\text{дэз}} \cdot \Delta x + \sqrt{\rho_{\text{дэз}}\rho_s}}{a}, \quad (7)$$

где Δx – величина зазора между контактом и затвором. Оценим величину общего сопротивления при средних величинах параметров СВЧ НЕМТ. Положим удельное сопротивление ДЭГ $\rho_{\text{дэз}} = 300$ Ом/мм, ширина канала – $a = 500$ мкм, Удельное сопротивление материала контакта $\rho_s = 10^{-6}$ Ом см², $\Delta x = 1$ мкм. После подстановки получим $R_{\text{общ}} = 0.6$ Ом + 0.347 Ом = 0.947 Ом.

При расчетах ВАХ транзистора определяется плотность стокового тока J_d , представляющая собой отношение тока к ширине канала:

$$j_d = \frac{I_d}{a}.$$

Поэтому падение напряжения на сопротивлении вывода определится следующей формулой:

$$\Delta U = R_{\text{общ}} I_d = j_d (\rho_{\text{дэз}} \cdot \Delta x + \sqrt{\rho_{\text{дэз}}\rho_s}), \quad (8)$$

в которой необходимо строго учитывать размерности входящих величин.

2. Влияние контактных сопротивлений на ВАХ транзистора.

Пусть имеется ВАХ транзистора, рассчитанная при нулевых сопротивлениях контактов. Она может выражаться формулой:

$$j_d = f(U_g, U_d), \quad (9)$$

в которой J_d – плотность тока стока, U_g – напряжение на затворе, U_d – напряжение стока. Напряжение общего электрода (истока) полагается равным нулю $U_s = 0$.

Приращение стокового тока J_3 , обусловленное изменениями напряжений U_1, U_3 , определится очевидной формулой:

$$\Delta J_d = \frac{\partial J_d}{\partial U_g} \Delta U_g + \frac{\partial J_d}{\partial U_d} \Delta U_d. \quad (10)$$

Если в цепях общего и выходного электродов имеются дополнительные сопротивления – r_s, r_d , то падения напряжений на них могут рассматриваться как приращения соответствующих напряжений: $\Delta U_g = -I_d r_s, \Delta U_d = -I_d r_d$, которые изменяют ток стока. Таким образом, имея величины сопротивлений r_s и r_d , мы можем скорректировать величину тока выходного электрода в каждой точке ВАХ. Для этого необходимо вычислить частные производные, входящие в (10). Первая из них является крутизной проходной ВАХ внутреннего транзистора, вторая определяет его малосигнальную выходную проводимость. Для определения этих параметров имеется двумерный массив данных, выражающих семейство ВАХ внутреннего транзистора (9).

$$J_{dmn} = f(U_{1m}, U_{3n}). \quad (11)$$

В этом массиве индекс m – номер ВАХ, индекс n – номер отсчета в ВАХ. Величина $\frac{\partial I_d}{\partial U_d}$ вычисляется как:

$$\frac{\partial J_d}{\partial U_d} = \frac{J_{dmn} - J_{dmn-1}}{U_{dn} - U_{dn-1}}. \quad (12)$$

Шаг по индексу n достаточно малый и вычисления по (2.12) вполне корректны.

Шаг по индексу m очень грубый – 1 В. Поэтому для вычислений

$\frac{\partial I_d}{\partial U_g}$ воспользуемся приближенными аналитическими соотноше-

ниями для ВАХ транзистора. Ток стока выражается через напряжения на электродах транзистора упрощенными формулами:

$$j_d = b \left(U_g - U_{\text{прг}} - \frac{U_d}{2} \right) U_d \quad \text{– на восходящей части ВАХ; (13)}$$

$$j_{\text{днас}} = b \frac{(U_g - U_{\text{прг}})^2}{2} \quad \text{– на горизонтальной части ВАХ. (14)}$$

Точка стыковки восходящего и горизонтального участков ВАХ соответствует стоковому напряжению

$$U_{\text{днас}} = U_g - U_{\text{пор}}. \quad (15)$$

В данных формулах b и $U_{\text{прг}}$ – соответственно постоянный коэффициент и величина порогового напряжения, которые определяются многочисленными параметрами структуры транзистора: длиной затвора, подвижностью носителей, параметрами барьерного слоя, энергиями уровней в квантовой яме и пр. Значения b и $U_{\text{прг}}$ необходимо определить из имеющихся ВАХ транзистора. Если данные величины определены, то в каждой точке ВАХ значение ее крутизны

$G_m = \frac{\partial I_d}{\partial U_g}$ легко вычисляется. Выражая параметр b из (13) и (14) и

подставляя его в соответствующую формулу для крутизны ВАХ, получим для наклонного и горизонтального участка следующие соотношения:

$$G_{\text{мнакл}} = \frac{\partial J_d}{\partial U_g} = \frac{j_d}{U_g - U_{\text{прг}} - \frac{U_d}{2}}; \quad (16)$$

$$G_m = \frac{\partial J_{\text{днас}}}{\partial U_g} = \frac{2j_{\text{днас}}}{U_g - U_{\text{прг}}}. \quad (17)$$

Таким образом, для вычисления крутизны ВАХ необходим лишь один параметр – величина порогового напряжения $U_{\text{прг}}$. Для его определения можно воспользоваться (15). Однако по реальной ВАХ внутреннего транзистора трудно с хорошей точностью определить точку ее выполаживания. Поэтому вычисление $U_{\text{прг}}$ точнее выполнить для последних точек двух средних ВАХ имеющегося их семейства. Выбор последних точек обусловлен тем, что они наверняка находятся на горизонтальном участке ВАХ, а выбор средних ВАХ обеспечит среднюю величину $U_{\text{прг}}$. Например, выбираем 2 последние точки ВАХ снятые при $U_{g1} = 1$ В и $U_{g2} = 2$ В. Используя их, находим:

$$G_m = \frac{J_N(-1B) - J_N(-2B)}{1B}.$$

Далее приравняем полученную величину правой части (17) и из полученного равенства вычисляем величину порогового напряжения:

$$U_{\text{прг}} = -1B \cdot \left(1 + \frac{2J_N(-1B)}{J_N(-1B) - J_N(-2B)} \right). \quad (18)$$

Полученная величина $U_{\text{прг}}$ подставляется в формулы (16, 17), которые определяют крутизну ВАХ в каждой ее точке. Затем по формуле (10) вычисляется приращение плотности стокового тока, обусловленное сопротивлениями контактов и далее значение плотности тока.

Влияние контактных сопротивлений на ВАХ транзисторов вполне очевидно, поскольку любая резистивность на пути протекания тока должна приводить к его ослаблению. Количественные характеристики этого ослабления рассчитаны и представлены ниже в виде графиков ВАХ внутреннего и реального транзисторов.

Зависимость одного из главных параметров транзисторов – малосигнальной крутизны (G_m) от величин контактных сопротивлений можно оценить по формуле зависимости G_m от сопротивления в цепи общего электрода – r .

$$G_m = \frac{G_{m0}}{1 + rG_{m0}}, \quad (19)$$

где G_{m0} – величина крутизны при нулевом сопротивлении r . В применении к рассматриваемым эффектам влияния контактных сопротивлений на параметры GaN транзисторов сопротивление r – это сопротивление истокового контакта. Как видно из (19), влияние контактного сопротивления особенно заметно при больших значениях крутизны внутреннего транзистора.

3. Расчет ВАХ НЕМТ транзисторов на основе GaN с учетом контактов. Для расчетов была выбрана гетероструктура, геометрия которой показана на рисунке 4.

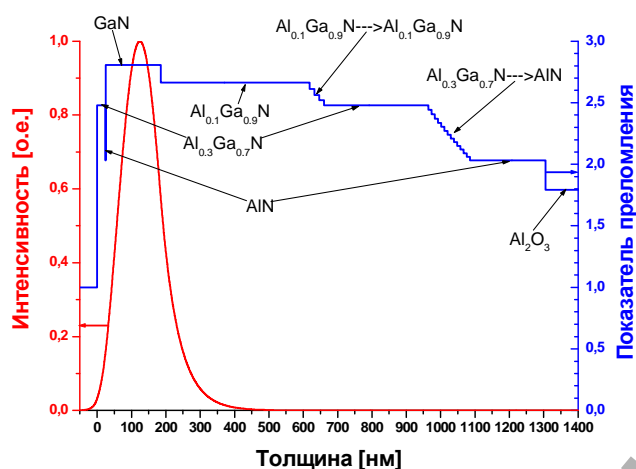


Рисунок 4 – Распределения показателя преломления и внутреннего электрического поля фундаментальной моды в гетероструктуре на основе GaN

Рассчитаем ВАХ НЕМТ-транзисторов на основе GaN с учетом контактов и крутизну данных ВАХ. Сопротивление контактов выбираем равным 0,4 Ом. При этом толщину GaN выбираем 40, 80, 120, 160 и 200 нм. Концентрацию Al в верхнем слое AlGaIn изменяем от 25 до 35 %. Результаты расчетов показаны на рисунках 5–20. ВАХ без учета контактов показаны значками. ВАХ с учетом контактов на графиках показаны сплошными линиями.

Из рисунков 5–19 видно, что учет сопротивлений контактов

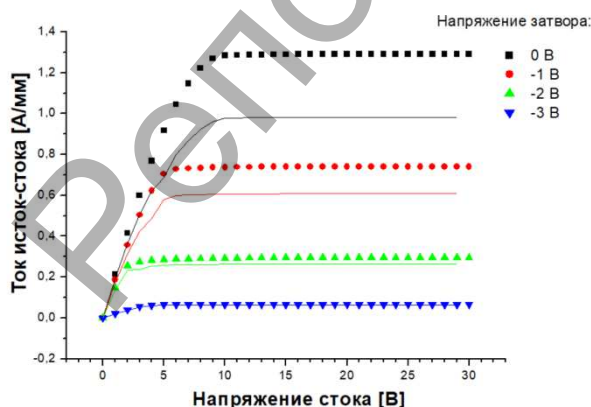


Рисунок 5 – Вольт-амперная характеристика НЕМТ-транзистора при толщине GaN 40 нм и концентрации Al 25 %

уменьшает величину тока исток–стока. Разница токов исток–стока без учета и с учетом контактов увеличивается для малых отрицательных напряжений на затворе. С увеличением отрицательного напряжения эта разница становится меньше и при приближении к пороговому напряжению разница токов незначительна. При увеличении концентрации Al от 25 до 35 % разница токов без учета и с учетом сопротивлений контактов возрастает с увеличением толщины GaN от 40 до 200 нм соответственно с 1,3 до 1,7 раза и с 1,5 до 2,1 раз.

Из рисунка 20 видно, что при увеличении толщины слоя GaN от 40 нм до 200 нм крутизна ВАХ возрастает в 1,45, 1,26 и 1,18 раза соответственно для концентраций Al 25 %, 30 % и 35 %. При увеличении концентрации Al от 25 % до 35 % максимальное значение крутизны возрастает в 1,4 раза.

Заключение. Расчет ВАХ типичных GaN транзисторов с учетом реализуемых в настоящее время контактов к областям стока и истока показал существенное влияние контактных сопротивлений на характеристики транзисторов. Естественно, что это влияние оказывается тем сильнее, чем более совершенным является транзистор. Данное обстоятельство ограничивает возможности улучшения усилительных характеристик, например, за счет увеличения мольной доли Al в барьерном слое.

Сопротивления контактов уменьшают величину канального тока как за счет непосредственного влияния, так и за счет токовой обратной связи через контактное сопротивление истока. Естественно, что при этом уменьшается крутизна ВАХ транзистора.

При увеличении концентрации Al от 25 до 35 % разница токов без учета и с учетом сопротивлений контактов возрастает с увеличением толщины GaN от 40 до 200 нм соответственно с 1,3 до 1,7 раза и с 1,5 до 2,1 раз.

При увеличении толщины слоя GaN от 40 нм до 200 нм крутизна ВАХ возрастает в 1,45, 1,26 и 1,18 раза соответственно для концентраций Al 25 %, 30 % и 35 %. При увеличении концентрации Al от 25 % до 35 % максимальное значение крутизны возрастает в 1,4 раза.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Механизмы протекания тока в омических контактах металл–полупроводник / Т. В. Бланк, Ю. А. Гольдберг // Физика и техника полупроводников. – 2007. – Т. 41. – Вып. 11. – С. 1281–1308.
- 2 Yoon, S. Localized TiSi and TiN phases in Si/Ti/Al/Cu Ohmic contacts to AlGaIn/GaN heterostructures / S. Yoon [et al.] // Semicond. Sci. Technol. – 2016. – Vol. 31, № 5. – P. 552–561.
- 3 Liu, Y. Int. J. Electron. Comput. Inf. Technol. / Y. Liu, M. K. Bera, L. M. Kyaw, G. Q. Lo, E. F. Chor. – № 6 (9). – 2012. – P. 957.
- 4 Сплавные омические контакты на основе Si/Al к нитридным гетеросистемам AlGaIn/GaN / Д. Н. Слаповский [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2017. – Т. 51. – Вып. 4. – С. 461–466.

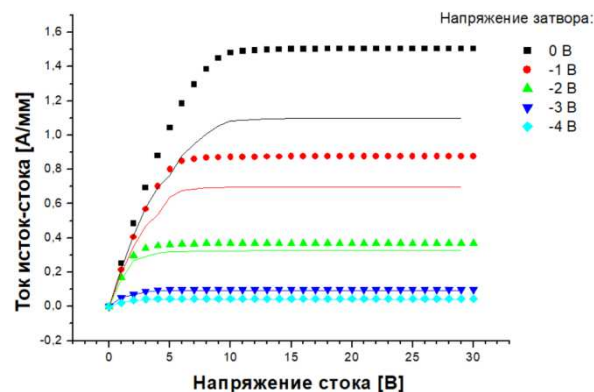


Рисунок 6 – Вольт-амперная характеристика НЕМТ-транзистора при толщине GaN 80 нм и концентрации Al 25 %

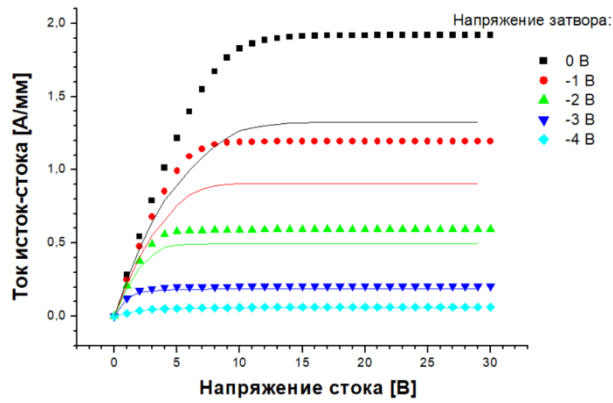


Рисунок 7 – Вольт-амперная характеристика НЕМТ-транзистора при толщине GaN 120 нм и концентрации Al 25 %

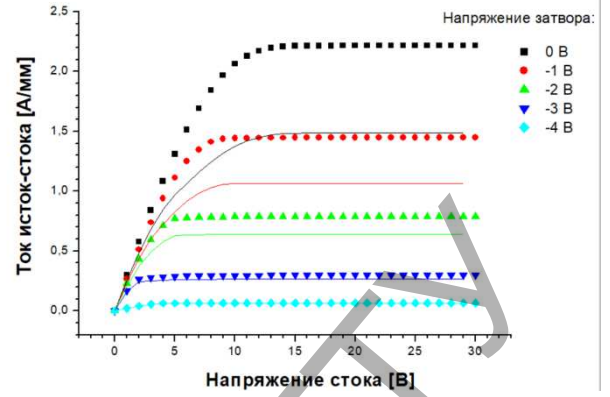


Рисунок 8 – Вольт-амперная характеристика НЕМТ-транзистора при толщине GaN 160 нм и концентрации Al 25 %

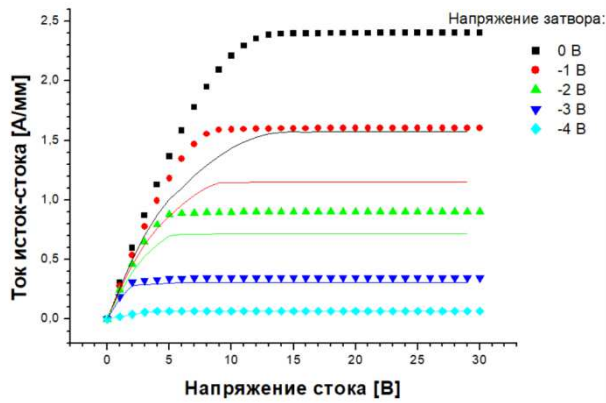


Рисунок 9 – Вольт-амперная характеристика НЕМТ-транзистора при толщине GaN 200 нм и концентрации Al 25 %

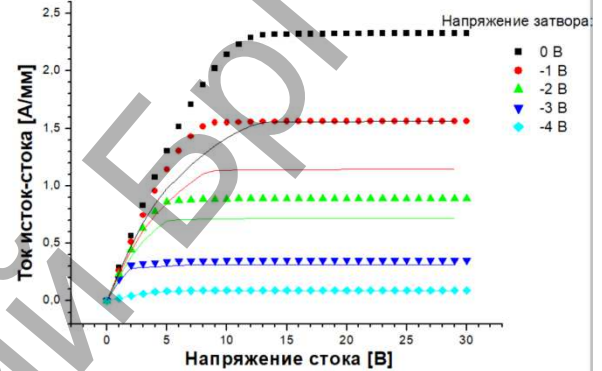


Рисунок 10 – Вольт-амперная характеристика НЕМТ-транзистора при толщине GaN 40 нм и концентрации Al 30 %

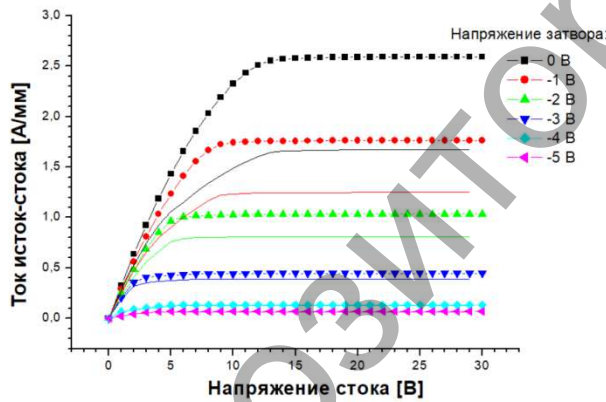


Рисунок 11 – Вольт-амперная характеристика НЕМТ-транзистора при толщине GaN 80 нм и концентрации Al 30 %

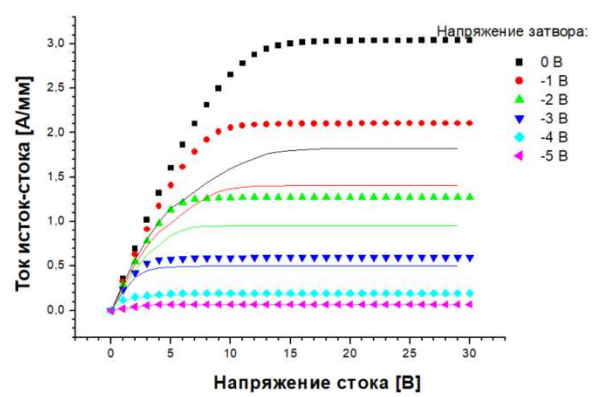


Рисунок 12 – Вольт-амперная характеристика НЕМТ-транзистора при толщине GaN 120 нм и концентрации Al 30 %

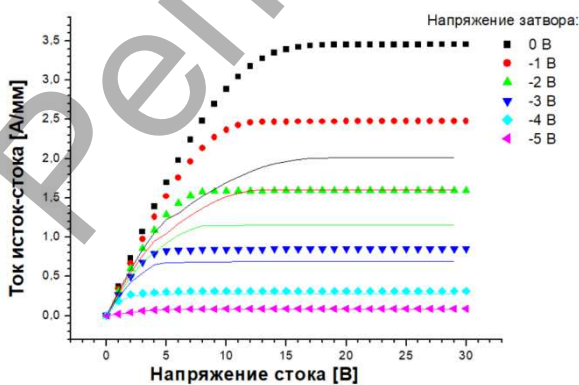


Рисунок 13 – Вольт-амперная характеристика НЕМТ-транзистора при толщине GaN 160 нм и концентрации Al 30 %

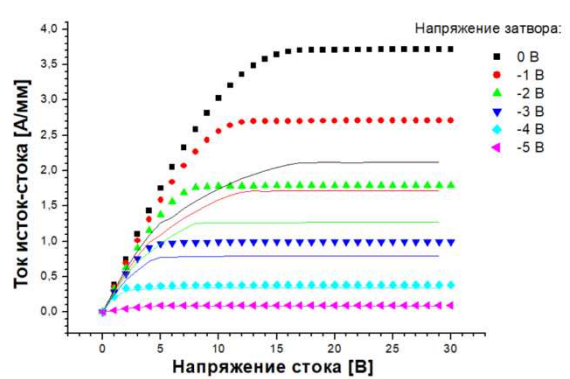


Рисунок 14 – Вольт-амперная характеристика НЕМТ-транзистора при толщине GaN 200 нм и концентрации Al 30 %

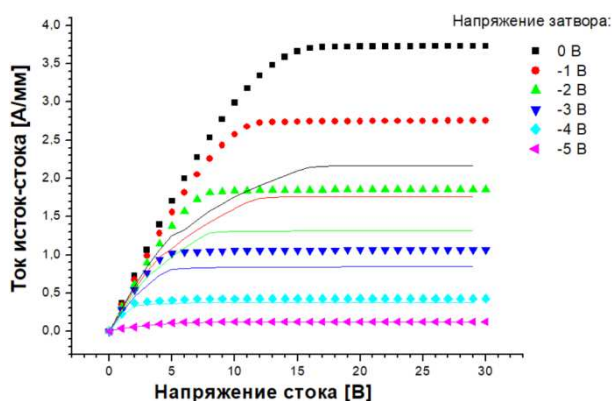


Рисунок 15 – Вольт-амперная характеристика НЕМТ-транзистора при толщине GaN 40 нм и концентрации Al 35 %

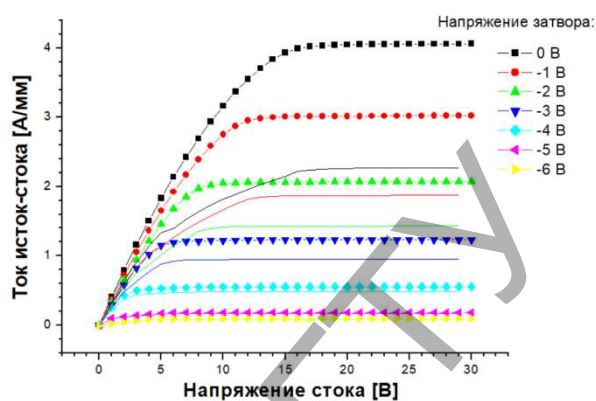


Рисунок 16 – Вольт-амперная характеристика НЕМТ-транзистора при толщине GaN 80 нм и концентрации Al 35 %

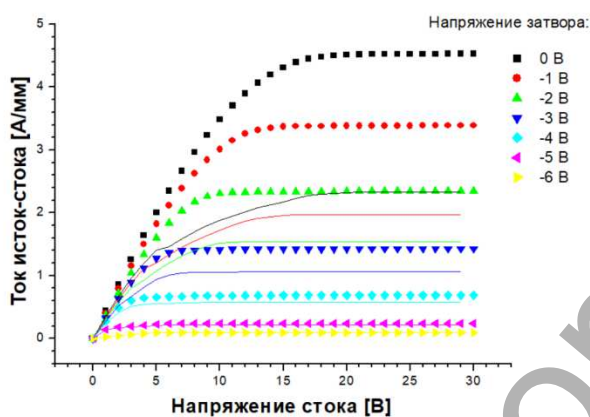


Рисунок 17 – Вольт-амперная характеристика НЕМТ-транзистора при толщине GaN 120 нм и концентрации Al 35 %

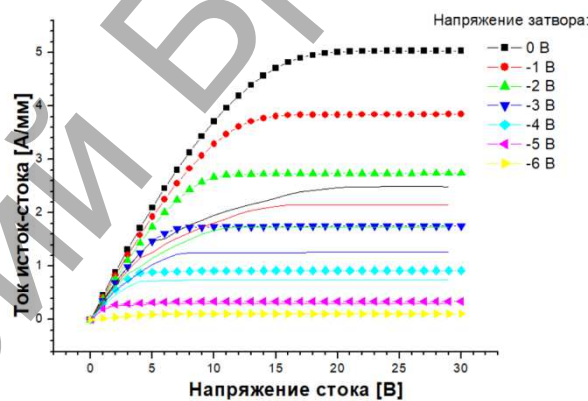


Рисунок 18 – Вольт-амперная характеристика НЕМТ-транзистора при толщине GaN 160 нм и концентрации Al 35 %

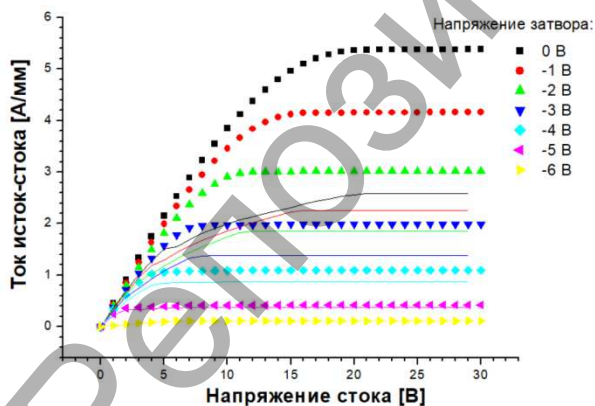


Рисунок 19 – Вольт-амперная характеристика НЕМТ-транзистора при толщине GaN 200 нм и концентрации Al 35 %

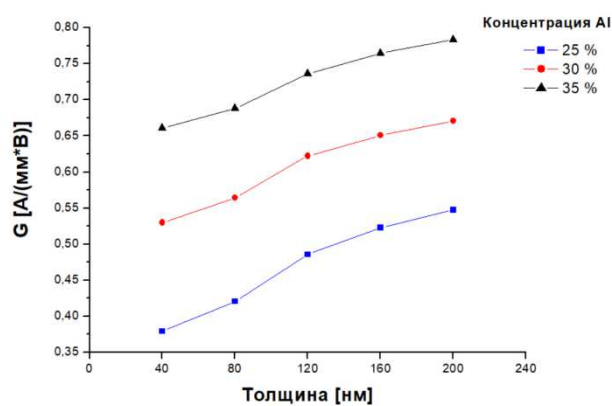


Рисунок 20 – Зависимость крутизны ВАХ от толщины GaN и концентрации Al

Материал поступил в редакцию 03.01.2019

TARASUK N. P., VORSIN N. N., LUTSENKO E. V., GLADYSHCHUK A. A. Influence of contact resistances on volt-ampere characteristics of GaN-based HEMT transistors

The results of calculations of the volt-ampere characteristics of HEMT-transistors based on GaN taking into account the contact resistances are presented. The volt-ampere characteristics of HEMT transistors have been compared for different thicknesses of GaN and different concentrations of Al.