

Рисунок 1 – Многослойная нейронная сеть для установления рейтинга объекта

Первоначальные веса стрелок ω_{ij} устанавливаются в соответствии с рекомендациями в [1] из интервала $(-1; 1)$, значения x_i всех входящих в вершину i стрелок получаются как произведения их весов на входы от вершин слева, рабочие значения входов 1 и 2 масштабируются путем умножения на 0.1 для их приведения в интервал, эффективный для использования сигмоиды в данной задаче; значения в вершинах графа 3,4,5 (y_i) получаются как результаты от функций $y=1/(1+e^{-x_i})$; $y_6 = x_6$; выход (рейтинг) получается как целое число при вычислении функции $y = \text{round}((y_6+10b), 0)$, т. е. ближайшее целое число к значению выражения в скобках.

Обучение осуществлялось на массиве из $n=6$ объектов методом обратного распространения ошибок [1] и было получено с помощью системы Маткад в виде следующих результатов: $\omega_{13} = 0.18$; $\omega_{14} = -0.15$; $\omega_{15} = 0.69$; $\omega_{23} = 0.11$; $\omega_{24} = 0.44$; $\omega_{25} = -0.17$; $\omega_{36} = 0.44$; $\omega_{46} = 0.52$; $\omega_{56} = 0.7$; $h = 0.85$ (норма обучения), A (число положительных разностей при вычитании из искомого для рейтинга показателя всех остальных $(n-1)$ поочередно, вход $1-a=A/10$, вход $2-b=[(n-1)/10-(a)]$. Результат (рейтинг) в данном случае определяется по возрастанию чисел на выходе (1-самый высокий рейтинг). Его легко можно перевести и в результат с отсчетом по убыванию номеров в порядке значимости членов ряда $(n+1-y)$.

Покажем, что результат годится и для других аналогичных множеств при n от 6 до 50. Пусть множество содержит следующий ряд из 15 чисел: 15.1; 15.3; 14.8; 13.5; 12.5; 16.7; 15.4; 14.5; 13.8; 12.6; 17.1; **14.2**; 13.3; 16.1; 14.9. Найдём рейтинг для выделенного жирным шрифтом числа. Исходные данные для расчётов будут включать названные веса стрелок в обученной сети, входы 1 и 2 ($a=0.5$ и $b=0.9$) и $n=15$. Тогда цепочка вычислений будет такой: $x_3=\omega_{13} \cdot a+\omega_{23} \cdot b=0.189$; $y_3=0.547$; $x_4=\omega_{14} \cdot a+\omega_{24} \cdot b=0.321$; $y_4=0.58$; $x_5=\omega_{15} \cdot a+\omega_{25} \cdot b=-0.498$; $y_5=0.378$; $x_6=\omega_{36} \cdot y_3+\omega_{46} \cdot y_4+\omega_{56} \cdot y_5=0.807$; $y_6=0.807$; $y=\text{round}((0.807+9), 0) = 10$, что подтверждает успешность обучения и для контрольного примера. Аналогичные результаты получаются не только для любого члена этого множества, но и для других примеров, встречающихся на практике, так как маловероятно изучение более 50 альтернатив.

По сути дела описанная сеть отражает закон вычисления рейтинга для любого заданного члена ряда.

Использование нейронных сетей после их обучения позволяет сразу получить № объекта в рейтинге. Сеть, описанная в системе Маткад после обучения при одном щелчке сразу выдаёт результат, а при обучении при одном щелчке можно получить также параметры следующего шага обучения, что позволяет быстро завершить его в диалоговом режиме.

Качественные показатели рекомендуется оценивать в баллах, что позволяет сохранить единую методику расчётов. Необходимость получения ответа в целых числах потребовала для прекращения обучения нулевой ошибки, т. е. абсолютного совпадения теоретического и вычисленного сетью результата.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Aveal Обучение нейронной сети. Алгоритм обратного распространения ошибок. Электронный ресурс. Microtechnics. : Режим доступа : Ru / obuchenie-nejronnoj-seti-algoritm-obratnogo-rasprostraneniya-oscibki. – Дата доступа : 21.11.2016.
2. Головкин, В.А. Основы компьютерных технологий: учебно-методическое пособие / В.А. Головкин, А.А. Дудкин, Л.П. Матюшков. – Брест : Издательство УО «БрГТУ», 2015. – 180 с.
3. Трахтенгерц, Э.А. Компьютерные системы и методы поддержки информационного управления / Э.А. Трахтенгерц. – Москва : Синтез, 2010. – 125 с.

Материал поступил в редакцию 13.02.2018

MATIOUSHKOV A.L., MATSIUSHKOVA H.L. The neural network to determine the object's rating

We present a neural network algorithm based on training given neural network structure modified by reverse error propagation

УДК 535:621.373.8

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

ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕМТ-ТРАНЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ GAN

Введение. Зависимость токов электронного прибора от напряжений на электродах, когда токи и напряжения неизменны во времени, называют статическими вольт-амперными характеристиками (ВАХ). При рассмотрении ВАХ трехэлектродных приборов, к которым относятся большинство транзисторов, принято один из электродов объявлять общим и потенциал его полагать равным нулю. Электрод, с которого в рабочем режиме снимается усиленный сигнал, считается выходным. Оставшийся третий электрод является управляющим. Обычно, при рассмотрении полевых транзисторов, в частности, НЕМТ, общим электродом назначается исток, выходным – сток,

управляющим – затвор. ВАХ, выражающая зависимость тока выходного электрода от напряжения на нем, при неизменном напряжении управляющего электрода, называется выходной. Обычно на одном графике изображается несколько выходных ВАХ, соответствующих различным значениям напряжения управляющего электрода. В результате получается т. н. семейство графиков ВАХ.

Удивительно, но с момента появления многоэлектродных ламп (триодов, пентодов) до настоящего времени форма выходных ВАХ усилительных приборов остается приблизительно одинаковой. Для нее характерен быстрый рост тока на начальном участке значений

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

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.

Гладыщук Анатолий Антонович, к.ф.-м.н., профессор кафедры физики Брестского государственного технического университета.

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

Физика, математика, информатика

напряжения выходного электрода и почти неизменное его значение на последующих участках. Данное поведение ВАХ обусловлено тем, что усилительные приборы делаются таким образом, чтобы обеспечить максимально эффективное управление током с управляющего, а не с выходного электрода.

При теоретическом рассмотрении ВАХ весьма популярным является метод «порогового напряжения», суть которого заключается в том, что ток выходного электрода считается нулевым, если напряжение между управляющим электродом и соответствующим сечением проводящего канала меньше некоторого порогового значения. При этом увеличение напряжения выходного электрода смещает напряжения прилежащих к нему сечений канала в сторону порогового напряжения, что ограничивает ток выходного электрода. В результате рост тока выходного электрода с увеличением напряжения на нем значительно замедляется, и кривая графика ВАХ идет почти горизонтально. Ток достигает величины насыщения. Конечно, применение этого метода возможно лишь при известной модели транзистора и физических характеристиках его компонентов.

Модель НЕМТ и оценка физических параметров. На рисунке 1 показана использованная модель транзистора с минимальным количеством выделенных слоев, которые представляют собой (сверху – вниз) металл, *n-AlGaIn*, нелегированный *AlGaIn*, нелегированный – *GaN* с 2-мерным электронным газом (DEG), подложка. Такая упрощенная модель не содержит барьера *AlN* между канальными *GaN* и барьерными *AlGaIn* слоями, не учитывает влияние множества переходных слоев реальных НЕМТ. Однако для качественного рассмотрения данными тонкостями пока пренебрегаем.

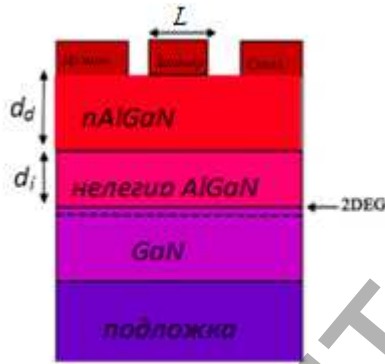


Рисунок 1 – Модель транзистора

Плотность связанных состояний электронов в квантовой яме определяется выражением

$$n_{bound}(z) = \frac{m_n^+ kT}{\pi^2} \sum_v |\psi_v(z)|^2 \ln \left[1 + \exp \left(\frac{F_n - E_v}{kT} \right) \right], \quad (1)$$

где k , h , m_n – постоянная Больцмана, Планка, эффективная масса электрона, $\psi_v(z)$ – волновая функция электронов в яме, определяемая при решении уравнения Шредингера, F_n – энергия Ферми. В нормальных условиях, при температуре около 300 К можно полагать, что только два нижних уровня находятся в зоне проводимости *GaN*, поэтому концентрация электронов ДЭГ выразится из (1.1) в следующем виде:

$$n_s = DkT \cdot \ln \left(\left(1 + \exp \left(\frac{E_F - E_1}{kT} \right) \right) \cdot \left(1 + \exp \left(\frac{E_F - E_2}{kT} \right) \right) \right), \quad (2)$$

где D – постоянный коэффициент, E_F – уровень Ферми *GaN* относительно дна зоны проводимости.

Влияние затвора на концентрацию электронов можно описать с использованием параметра – порогового напряжения:

$$n_s(m) = \frac{e(m)}{q(d_d + d_i)} \left(U_g - U_{nop} - \frac{E_F}{q} \right). \quad (3)$$

Здесь q – заряд электрона, ϵ и $d = d_d + d_i$ – диэлектрическая проницаемость и полная толщина слоя *AlGaIn* соответственно; U_{nop} – пороговое напряжение НЕМТ, которое определяется формулой:

$$U_{nop} = \Phi_b - \Delta E_c - \frac{qN_s d_{AlGaIn}^2}{2\epsilon_{AlGaIn}} - \sigma \frac{d_{AlGaIn}}{\epsilon_{AlGaIn}}, \quad (4)$$

где Φ_b – эффективная высота барьера Шоттки, ΔE_c – разрыв зоны проводимости на границе раздела между *AlGaIn* и слоями *GaN*,

$\frac{qN_s d_{AlGaIn}^2}{2\epsilon_{AlGaIn}}$ – концентрация легирования в слое *n-AlGaIn*, а

σ – плотность зарядов поляризации на границе раздела. Уравнения (2) и (3) образуют систему уравнений, решение которой дает концентрацию ДЭГ, образующего канал транзистора:

$$n_s(m) = \frac{2e^2 m_e d}{2e^2 m_e d + \epsilon_m \pi^2} \left[(U_g - U_{nop}) \frac{\epsilon_m}{ed} + \frac{m_e}{\pi^2} (E_1 + E_2) \right] - \frac{m_e}{\pi^2} (E_1 + E_2), \quad (5)$$

где E_1 и E_2 – энергии уровней.

Формулы (4), (5) позволяют оценить величину U_{nop} и концентрацию электронов в канале транзистора при $U_g > U_{nop}$ при различных значениях толщины слоев *AlGaIn*. Если $U_g < U_{nop}$, концентрация свободных электронов считается нулевой. На рисунке 2 показаны графики зависимости n_s от U_g для различных значений толщины легированного слоя *AlGaIn*.

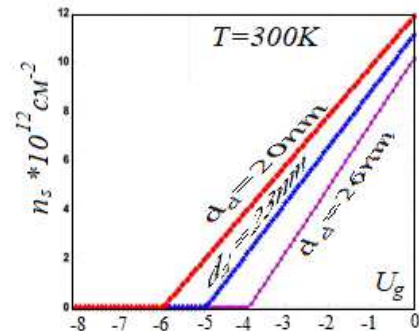


Рисунок 2 – Зависимости n_s от U_g для различных значений толщины легированного слоя *AlGaIn*

Видно, что при уменьшении толщины d_d – легированного слоя *AlGaIn* концентрация носителей в ДЭГ возрастает.

Пороговое напряжение транзистора смещается в сторону увеличения в абсолютном значении с уменьшением d_d .

Увеличение электронной плотности связано с усилением эффекта пьезоэлектрической и спонтанной поляризации.

Наклон графиков $n_s - U_g$ выражает электроёмкость между затвором и каналом, которая непосредственно связана с распределением потенциала между затвором и 2-DEG. Для $d_d = 20$ нм, наклон составляет $2,1 \times 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{В}^{-1}$, тогда как для $d_d = 26$ нм наклон составляет $1,4 \times 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{В}^{-1}$. Это показывает, что высокие значения ширины барьера благоприятны для достижения большей электронной плотности и получения меньших значений емкости затвора.

Другим варьируемым параметром гетероструктуры типа *AlGaIn/GaN* является содержания в ней *Al*. Диапазон возможных вариаций не особенно широк. Обычно, мольная доля *Al* изменяется от 0,15 до 0,35 и влияет на положение энергетических уровней E_1 , E_2 , входящих в уравнения (2, 5). На рисунке 3 показаны графики зависимости концентрации ДЭГ от напряжения на затворе при различных величинах доли *Al*.

Из графиков видно, что увеличение молей *Al* в *AlGaN/GaN* НЕМТ увеличивает плотность электронов, а также влияет на величину порогового напряжения, которое увеличивается по абсолютной величине. Однако это не изменяет наклон характеристик N_s-U_g .

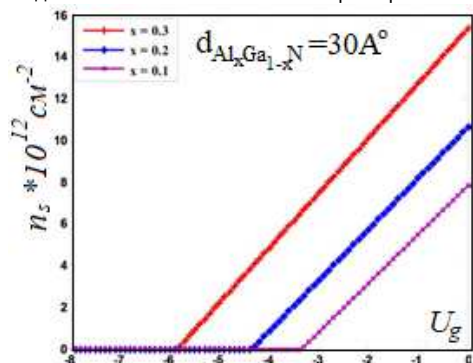


Рисунок 3 – Зависимости концентрации ДЭГ от напряжения на затворе при различных величинах доли *Al*

Вольт-амперные характеристики. Полагая подвижность – μ константой, можно записать для плотности тока в сечении *X* канала очевидную формулу:

$$j = qn_s(x)\mu \frac{dU}{dx}, \quad (6)$$

в которой ось *X* направлена вдоль канала от истока к стоку. Плотность тока должна быть одинаковой во всех сечениях канала (не зависит от *X*), а концентрация носителей управляется напряжением затвора, согласно формуле (5), в которую вместо U_g необходимо подставить $U_g-U(x)$. На границах канала, примыкающих к истоку и стоку, координата *x* равна соответственно 0 и *L*, где *L* – длина канала согласно рисунку 1. При этом $U(0)=0, U(L)=U_d$.

Вычисление тока стока приходится делать отдельно для двух участков ВАХ. На первом участке концентрация носителей на протяжении всего канала не равна нулю, т. е. $U_g-U_d > U_{пор}$. При этом плотность тока увеличивается с ростом стокового напряжения и выражается следующей формулой:

$$j_d = \frac{\mu\beta e}{L} \left(U_g - U_n - \frac{U_d}{2} \right) U_d. \quad (7)$$

Согласно этому выражению, плотность тока в канале достигает максимума при $U_g=U_g-U_{пор}$. Для дальнейшего увеличения стокового напряжения формула (7) будет неверна, поскольку ток канала достиг насыщения и далее не зависит от напряжения стока.

Величину стокового напряжения, при котором достигается насыщение стокового тока, можно оценить по исключительно простой формуле

$$U_{днас} = U_g - U_{пор}. \quad (8)$$

Не менее простая формула получается для плотности тока насыщения

$$j_{днас} = \frac{\mu\beta e}{L} \frac{(U_g - U_n)^2}{2}. \quad (9)$$

На рисунке 4 приведены ВАХ идеализированного транзистора, построенные по формулам (3–9). Как будет видно из дальнейшего, форма ВАХ и порядки величин ее параметров оказываются весьма близкими к тем, которые дают более точные модели процессов в НЕМТ.

2. Расчеты ВАХ с помощью программного комплекса FETIS. Программное обеспечение FETIS™ позволяет с хорошей точностью моделировать полевые транзисторы из нитридов 3 группы, учитывая пьезоэффект слоев, используя квантовомеханическое описание движения носителей, учитывая поверхностные эффекты. Именно этот программный комплекс применялся для оценок ВАХ транзисторов при различных исходных условиях.

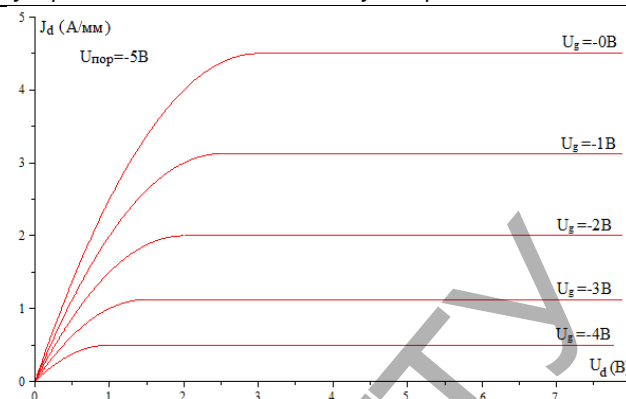


Рисунок 4 – ВАХ идеализированного транзистора

Для расчетов была выбрана гетероструктура, геометрия которой показана на рисунке 5.

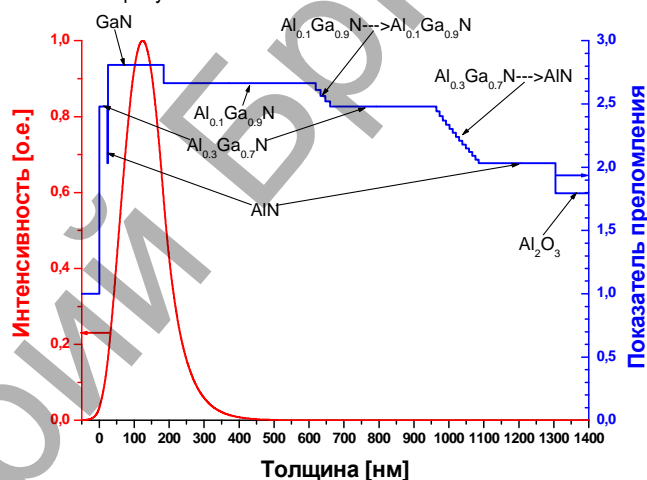


Рисунок 5 – Распределения показателя преломления и внутреннего электрического поля фундаментальной моды в гетероструктуре на основе *GaN*

Рассчитаем ВАХ НЕМТ–транзисторов на основе *GaN*. При этом толщину *GaN* выбираем 100 и 160 нм. Концентрацию *Al* в верхнем слое *AlGaN* изменяем от 20 до 40%. Результаты расчетов показаны на рисунках 6–15.

Из рисунков 6–15 и таблиц 1 и 2 видно, что увеличение мольной доли алюминия в барьерном слое *AlGaN* приводит к возрастанию плотности стокового тока транзистора. Это понятно, поскольку увеличение доли алюминия – *X* расширяет запрещенную зону *AlGaN*, что описывается формулой:

$$E_{g(AlGaN)} = xE_{g(AlN)} + (1-x)(E_{g(GaN)} - x \cdot 0.53\epsilon).$$

В результате увеличивается разрыв зон на границе с каналным слоем

$$\Delta E_g = E_{g(AlGaN)} - E_{g(GaN)} = \Delta E_c + \Delta E_v$$

и увеличивается концентрация носителей в канале (см. график рис. 3).

При изменении концентрации *Al* от 20 % до 40 % при напряжениях затвора 0 В, -1 В, -2 В, -3 В, -4 В и -5 В ток насыщения истока-стока увеличивается соответственно на 5,41 А/мм, 4,67 А/мм, 3,95 А/мм, 3,16 А/мм, 2,33 А/мм и 1,6 А/мм для толщины слоя *GaN* 100 нм. При изменении концентрации *Al* от 20 % до 40 % при напряжениях затвора 0 В, -1 В, -2 В, -3 В, -4 В и -5 В ток насыщения исток-стока увеличивается соответственно на 5,79 А/мм, 5,06 А/мм, 4,31 А/мм, 3,64 А/мм, 2,69 А/мм и 1,86 А/мм для толщины слоя *GaN* 160 нм. Как мы видим, ток насыщения истока-стока несколько больше для толщины слоя *GaN* 160 нм, чем для 100 нм. Разница между

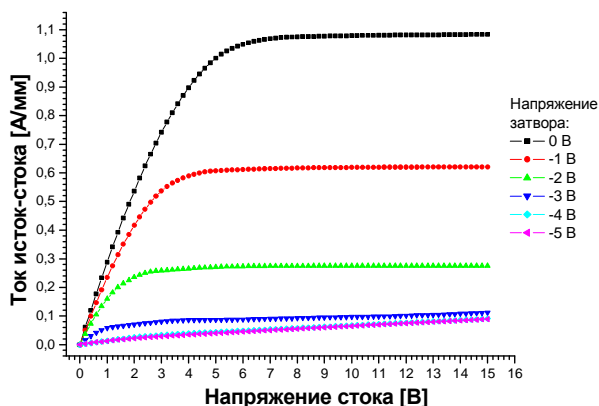


Рисунок 6 – Зависимость тока истока–стока от напряжения стока при толщине слоя GaN, равной 100 нм, и концентрации Al, равной 20 %

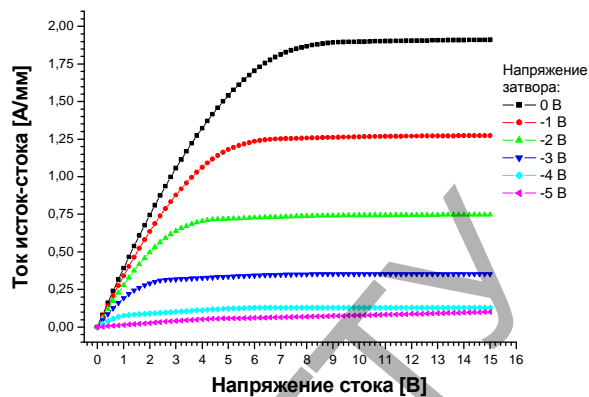


Рисунок 7 – Зависимость тока истока–стока от напряжения стока при толщине слоя GaN, равной 100 нм, и концентрации Al, равной 25 %

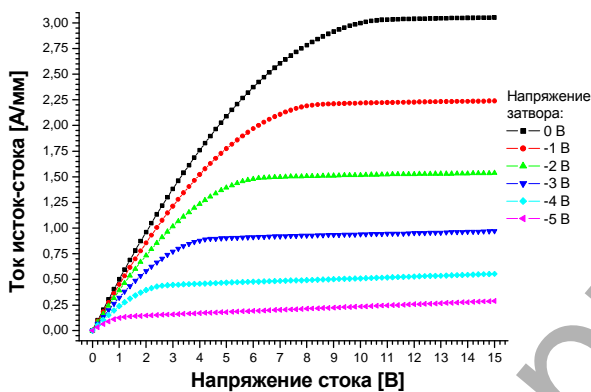


Рисунок 8 – Зависимость тока истока–стока от напряжения стока при толщине слоя GaN, равной 100 нм, и концентрации Al, равной 30 %

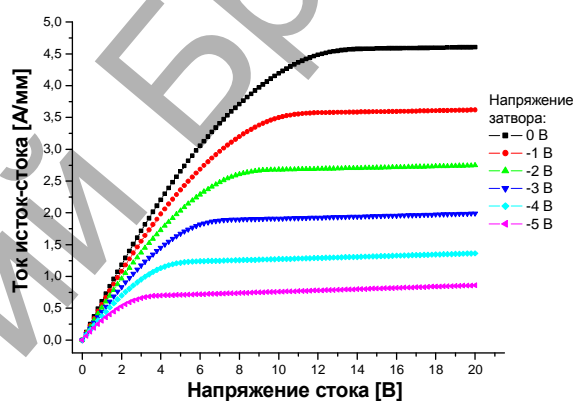


Рисунок 9 – Зависимость тока истока–стока от напряжения стока при толщине слоя GaN, равной 100 нм, и концентрации Al, равной 35 %

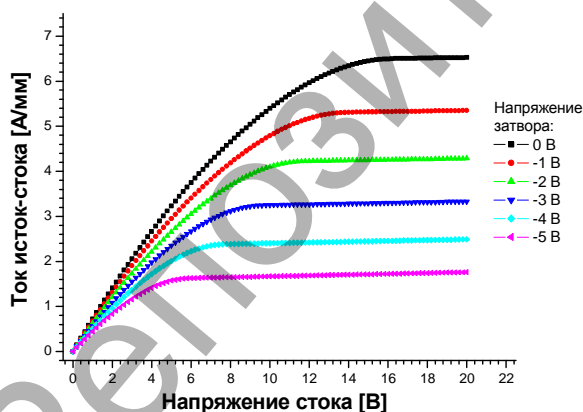


Рисунок 10 – Зависимость тока истока–стока от напряжения стока при толщине слоя GaN, равной 100 нм, и концентрации Al, равной 40 %

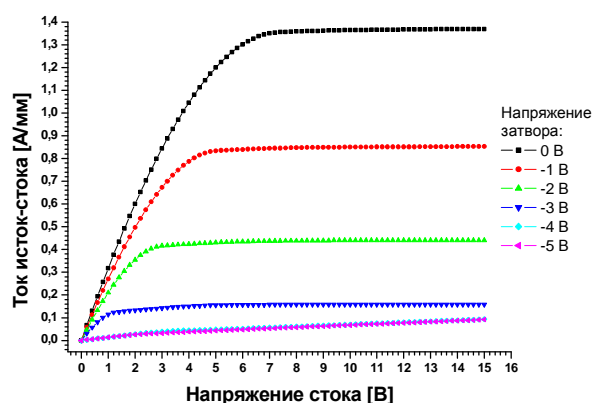


Рисунок 11 – Зависимость тока истока–стока от напряжения стока при толщине слоя GaN, равной 160 нм, и концентрации Al, равной 20 %

значениями тока насыщения истока–стока при соседних значениях напряжений затвора возрастает при уменьшении отрицательного напряжения на затворе. Также эта разница возрастает при изменении концентрации Al от 20 % до 40 %. Эта разница немного больше для слоя GaN 160 нм. При большей разнице усилительные характеристики малосигнальных НЕМТ-транзисторов лучше.

Максимальное значение напряжения стока, при котором наступает насыщение, соответствуют напряжению затвора 0 В и концентрации Al в слое 40 % и для толщин слоя GaN 100 нм и 160 нм равно соответственно 15,6 В и 16,2 В. Минимальное значение напряжения стока, при котором наступает насыщение, соответствуют напряжению затвора -5 В и концентрации Al в слое 20 % и для толщин слоя GaN 100 нм и 160 нм равно соответственно 0 В и 0 В.

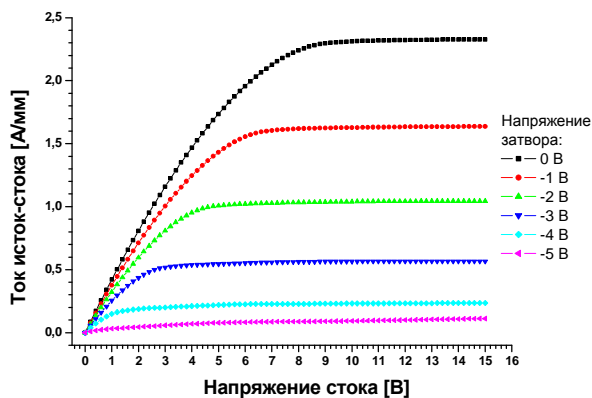


Рисунок 12 – Зависимость тока истока–стока от напряжения стока при толщине слоя GaN, равной 160 нм, и концентрации Al, равной 25 %

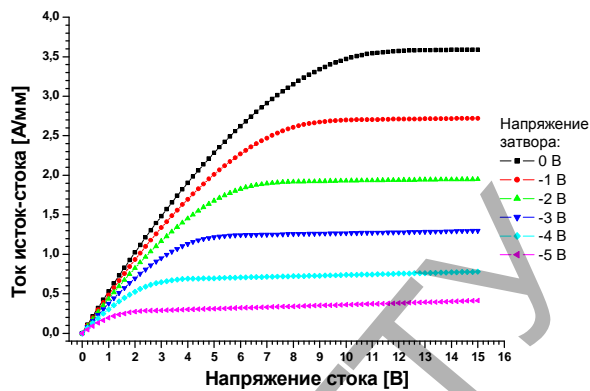


Рисунок 13 – Зависимость тока истока–стока от напряжения стока при толщине слоя GaN, равной 160 нм, и концентрации Al, равной 30 %

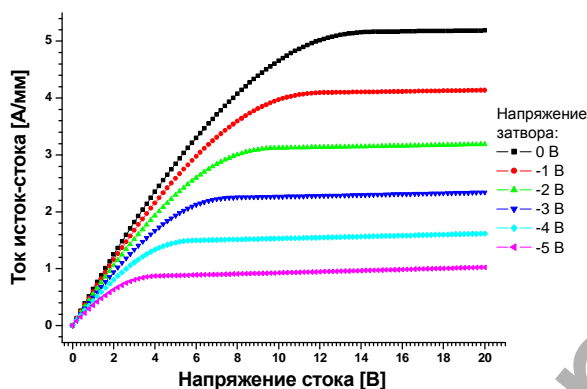


Рисунок 14 – Зависимость тока истока–стока от напряжения стока при толщине слоя GaN равной 160 нм и концентрации Al равной 35 %

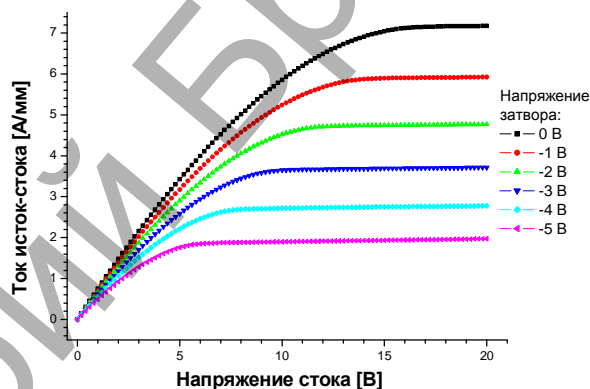


Рисунок 15 – Зависимость тока истока–стока от напряжения стока при толщине слоя GaN равной 160 нм и концентрации Al равной 40 %

Таблица 1 – Зависимость тока насыщения истока–стока и напряжения стока при достижении тока насыщения от концентрации Al при толщине слоя GaN, равной 100 нм

	Напряжение затвора, В					
	0	-1	-2	-3	-4	-5
	Ток насыщения исток-сток А/мм, (напряжение стока, В)					
Al 20%	1,07 (7,0)	0,61 (4,8)	0,25 (2,6)	0,06 (1,4)	0,00 (0,0)	0,00 (0,0)
Al 25%	1,89 (8,6)	1,24 (6,2)	0,70 (4,0)	0,31 (2,4)	0,08 (1,0)	0,00 (0,0)
Al 30%	3,02 (10,4)	2,20 (8,2)	1,48 (6,0)	0,89 (4,2)	0,44 (2,6)	0,13 (1,2)
Al 35%	4,56 (13,2)	3,55 (10,8)	2,65 (8,6)	1,87 (6,8)	1,20 (4,8)	0,68 (3,4)
Al 40%	6,48 (15,6)	5,28 (13,2)	4,20 (11,0)	3,22 (9,0)	2,33 (6,8)	1,60 (5,4)

Таблица 2 – Зависимость тока насыщения истока–стока и напряжения стока при достижении тока насыщения от концентрации Al при толщине слоя GaN, равной 160 нм

	Напряжение затвора, В					
	0	-1	-2	-3	-4	-5
	Ток насыщения исток-сток А/мм, (напряжение стока, В)					
Al 20%	1,36 (7,4)	0,84 (5,0)	0,43 (3,0)	0,14 (1,6)	0,05 (0,0)	0,05 (0,0)
Al 25%	2,32 (9,2)	1,63 (6,8)	1,03 (4,8)	0,54 (3,0)	0,21 (1,4)	0,06 (1,0)
Al 30%	3,57 (11,0)	2,71 (8,8)	1,93 (6,6)	1,27 (4,8)	0,73 (3,0)	0,33 (1,4)
Al 35%	5,17 (13,2)	4,12 (11,0)	3,15 (8,8)	2,30 (7,0)	1,56 (5,2)	0,95 (3,6)
Al 40%	7,15 (16,2)	5,90 (13,8)	4,74 (11,6)	3,78 (9,6)	2,74 (7,6)	1,91 (5,8)

Напряжение стока, при котором наступает насыщение, возрастает при увеличении концентрации Al в слое при заданном напряжении затвора. Чем больше напряжение стока, при котором наступает насыщение, тем круче возрастает соответствующий участок кривой

ВАХ. Это улучшает характеристики и повышает КПД мощных НЕМТ-транзисторов.

Заключение. Рассчитаны ВАХ НЕМТ-транзисторов на основе GaN.

При изменении концентрации Al от 20 % до 40 % при напряжениях затвора 0 В, -1 В, -2 В, -3 В, -4 В и -5 В ток насыщения истока-стока увеличивается соответственно на 5,41 А/мм, 4,67 А/мм, 3,95 А/мм, 3,16 А/мм, 2,33 А/мм и 1,6 А/мм для толщины слоя GaN 100 нм. При изменении концентрации Al от 20 % до 40 % при напряжениях затвора 0 В, -1 В, -2 В, -3 В, -4 В и -5 В ток насыщения истока-стока увеличивается соответственно на 5,79 А/мм, 5,06 А/мм, 4,31 А/мм, 3,64 А/мм, 2,69 А/мм и 1,86 А/мм для толщины слоя GaN 160 нм. Как мы видим ток насыщения истока-стока несколько больше для толщины слоя GaN 160 нм, чем для 100 нм. Разница между значениями тока насыщения истока-стока при соседних значениях напряжений затвора возрастает при уменьшении отрицательного напряжения на затворе. Также эта разница возрастает при изменении концентрации Al от 20 % до 40 %. Эта разница немного больше для слоя GaN 160 нм. При большей разнице усилительные характеристики малосигнальных HEMT-транзисторов лучше.

Максимальное значение напряжения стока, при котором наступает насыщение, соответствуют напряжению затвора 0 В и концентрации Al в слое 40 % и для толщин слоя GaN 100 нм и 160 нм равно соответственно 15,6 В и 16,2 В. Минимальное значение напряжения стока, при котором наступает насыщение, соответствуют напряжению затвора -5 В и концентрации Al в слое 20 % и для

толщин слоя GaN 100 нм и 160 нм равно соответственно 0 В и 0 В. Напряжение стока, при котором наступает насыщение, возрастает при увеличении концентрации Al в слое при заданном напряжении затвора. Чем больше напряжение стока, при котором наступает насыщение, тем круче возрастает соответствующий участок кривой ВАХ. Это улучшает характеристики и повышает КПД мощных HEMT-транзисторов.

Авторы выражают благодарность Ворсину Н.Н. и Чугунову С.В. за помощь в подготовке статьи.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Федоров, Ю.В. Исследования влияния толщины барьерного слоя гетероструктур $AlGaIn/AlN/GaN/Сапфир$ на параметры HEMT КВЧ диапазона / Ю.В. Федоров, Д.Л. Гнатюк, Р.Р. Галиев [и др.] – Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА: сборник IX научно-технической конференция; 1–3 декабря – Звенигород, 2010.
2. Chabak, K. Processing Methods for Low Ohmic Contact Resistance in AlN/GaN MOSHEMTs – CS MANTECH: Conference, May18th-21st. – 2009.
3. C. Y. Chang, et al. Very Low Sheet Resistance AlN/GaN High Electron Mobility Transistors. – CSMANTECH: Conference, May18th-21st. – 2009.

Материал поступил в редакцию 17.12.2017

TARASUK N.P., LUTSENKO E.V., GLADYSHCHUK A.A. Volt-ampere characteristics of HEMT-transistors based on GaN

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

УДК 681.3.06

Ворсин Н.Н., Гладыщук А.А., Кушнер Т.Л.

МОДЕРНИЗАЦИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА КСВУ-23

Введение. Оптическая спектроскопия занимает существенное место в арсенале инструментальных средств физических исследований [1–3]. Она обеспечивает хорошую чувствительность и селективность при решении задач обнаружения и оценки количества исследуемых веществ. На мировом рынке спектрально-аналитическую аппаратуру представляют множество компаний: Perkin Elmer, Bruker, Shimadzu, Nicolette, Jobin Yvon и др. Как правило, данная аппаратура функционирует под управлением ПК с ОС Windows, что позволяет воспользоваться огромным арсеналом программного обеспечения, созданного для этой ОС, и упрощает обмен, сохранение и обработку спектрометрической информации.

В последние годы отечественные спектрально – аналитические комплексы строятся по такому же принципу. Однако в исследовательских, производственных, учебных лабораториях имеется огромный парк старой спектрально – аналитической аппаратуры, которая не используется в силу того, что ее электронно-вычислительная часть морально устарела и несовместима с современной вычислительной техникой. В тоже время оптико-механические узлы данной аппаратуры не уступают современным зарубежным аналогам, а зачастую превосходят их.

Оснащение этих приборов современными устройствами ВТ для управления процессом измерения, обработки и сохранения получаемых данных позволит поднять их до уровня, удовлетворяющего современным требованиям к спектрально-аналитическим технологиям. Данная идея очевидна, и имеется множество работ, посвященных ее реализации, например, [4–6]. Однако предлагаемые там решения чрезмерно фундаментальны, сложны и, практически, недопустимы для повторения.

Ниже описана модернизация спектрально-аналитического ком-

плекса КСВУ-23, минимизированная по финансовым и трудовым затратам, но решающая три основные задачи автоматизации спектрального эксперимента: управление сканирующим приводом, представление результатов в цифровом и графическом виде, сохранение информации в виде текстовых файлов. Связь комплекса с ПК осуществляется либо через порт USB шины, либо через Com-порт. Последнее сделано для возможности подключения ПК, находящегося на большом расстоянии от пульта управления (более 3 м).

Описание модернизации. С целью минимизации затрат все узлы комплекса, за исключением ЭВМ ДЗ-28 (или ДВК), сохраняются. На рисунке 1 приведена структурная схема модернизированного комплекса. Из нее видно, что доработке подвергся только усилительно - регистрационный блок.

Эта доработка заключается в том, что из него удаляются все узлы, обеспечивавшие связь блока с ЭВМ. Вместо них, на единственной оставшейся плате усилительного узла устанавливается небольшой модуль сопряжения, содержащий одну микросхему – микроконтроллер (МК) $pic18f2550$ и интегральный стабилизатор напряжения ее питания 7805L. Размеры данного модуля 54*64 мм. Он обеспечивает связь с ПК через USB или com-порт, управление шаговым двигателем (ШД) монохроматора, оцифровку и первичное накопление сигналов, поступающих от ФЭУ. Питание модуля осуществляется от имеющегося в блоке источника. Используемый МК содержит 10 - разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), который оцифровывает усиленные сигналы обоих ФЭУ. Внешний вольтметр Щ1413, который прежде выполнял функцию АЦП, может быть исключен из состава комплекса или оставлен в роли визуального индикатора уровней аналоговых сигналов.

Электрическая схема модуля сопряжения показана на рисунке 2.

Ворсин Николай Николаевич, к.ф.-м.н., доцент кафедры физики Брестского государственного технического университета.

Кушнер Татьяна Леонидовна, начальник отдела довузовской подготовки Брестского государственного технического университета.

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