

Влияние поляризационных явлений на вольтамперные характеристики GaN/AlGaN гетеротранзисторов, не имеющих донорного легирования

А.С. Чернова

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Аннотация. В диапазоне напряжений и токов, превышающем четыре порядка величин, измерены и объяснены особенности вольтамперных характеристик AlGaN/GaN гетеротранзисторов, у которых плотность двумерного электронного газа формируется без использования донорного легирования. Построена модель управления током транзистора, которая учитывает поляризацию диполей и доменов, возникающих под затвором в слое AlGaN при включении затворного напряжения. Модель хорошо согласуется с экспериментом.

Ключевые слова: AlGaN/GaN гетеротранзистор, электрическая поляризация, вектор поляризации, управление током стока.

1. Введение

Нам предстояло изучить влияние радиации на эксплуатационные параметры нелегированных GaN/AlGaN транзисторов, в канале которых плотность двумерного электронного газа создается посредством спонтанной и пьезоэлектрической поляризации [1]. Известно [2], что накопление радиационной дозы сначала ведет к слабой деградации параметров прибора, сопровождающейся появлением токов утечки и увеличением интенсивности низкочастотных шумов; затем происходит искажение вольтамперных характеристик (ВАХ), и в конечном итоге прибор становится непригодным к работе.

Для проведения таких исследований нужно хорошо понимать физические особенности построения ВАХ, начиная с самых малых токов, которые в обычной практике не используются. Теоретическое описание ВАХ гетеротранзисторов такого типа отсутствует. Поэтому мы решили их измерить в диапазоне напряжений и токов, охватывающем четыре порядка величин, проанализировать, и построить физические модели, объясняющие особенности их строения во всем этом диапазоне.

2. Объекты исследования и результаты измерений

Транзисторы повышенной мощности изготовлены по технологии МЛЭ на подложке из карбида кремния, работают на частотах $f \leq 6$ ГГц. Расстояние между истоком и стоком $L_{sd} = 4,8$ мкм, длина затвора $L_g = 0,5$ мкм, его ширина $W = 350$ мкм, расстояние от истока до оси затвора $L_{s0} = (1.8 \pm 0.5)$ мкм; концентрация свободных носителей заряда в слоях AlGaN и GaN $n_s \approx 10^{15}$ см⁻³. Плотность двумерного электронного газа в канале $n_s = 7,3 \cdot 10^{12}$ см⁻², подвижность $\mu = 1950$ см²/Вс. Обследованы четыре экземпляра. Пороговое напряжение у трех транзисторов $U_t \approx -3,2$ В, у одного $U_t \approx -4.2$ В.

ВАХ измеряли полуавтоматическим методом, но при токах менее 1 мА погрешность нас не устраивала, в том числе и потому, что с понижением тока стока транзистор вел себя

все более нестабильно. Аппаратуру меняли на более точную и работали вручную.

В линейном масштабе большое количество графической информации сложно обозреть, поэтому на рис. 1 измеренное у транзистора №1 семейство выходных ВАХ представлено в двойном (по обеим осям) логарифмическом масштабе. Такой масштаб существенно меняет форму изображения, но вместе с тем на порядки расширяет площадь обозрения, делая одинаково доступными для анализа как крупные, так и самые мелкие детали.

Из рисунка видно, что по мере приближения затворного напряжения к нулю, ВАХ сгущаются, что объясняется насыщением тока стока. Чтобы не сжечь транзистор, токи ограничивали. При смещениях $-3 > U_g > U_t$ близких к пороговому значению U_t , находится область малых и неупорядоченных токов стока.

При смещениях $U_g \geq -3$ В и стоковых напряжениях $U_d < 0,1$ В токи растут пропорционально напряжению стока, образуя наклонно-параллельные прямые. В линейном масштабе такие зависимости представляют собой прямые лучи, веерообразно исходящие из одной точки под разными углами к оси абсцисс: чем больше угол, тем больше ток. Так ведет себя обычный резистор, у которого проводимость тем больше, чем больше электронов. В рассматриваемом случае их число зависит только от напряжения на затворе.

Получены формулы, которые позволяют по результатам измерений определить произведение плотности электронов на дрейфовую подвижность у токов стока, протекающих через резисторную область.

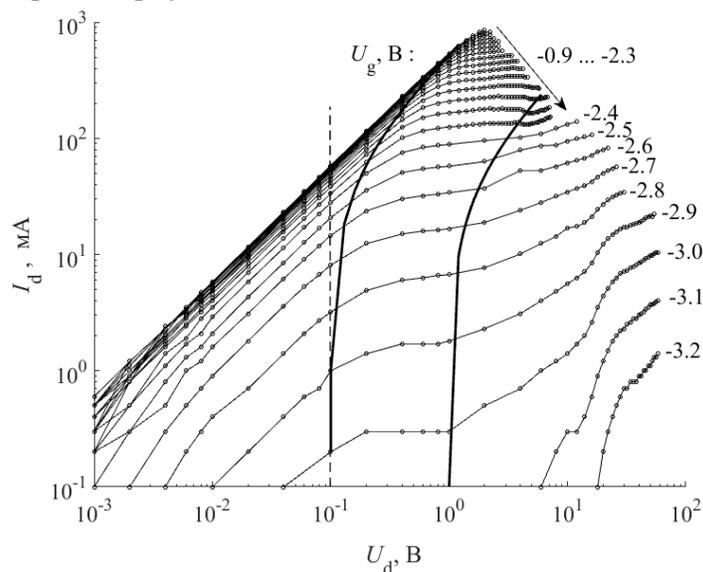


Рисунок 1. Зависимости тока стока от напряжения на стоке при вариации затворного напряжения

При увеличении напряжения стока по мере выхода из области резисторной проводимости наклонные прямые линии тока начинают изгибаться вниз, переходя к насыщению. Точки изгиба снизу-вверх пересекает граница, разделяющая эти две области. При дальнейшем увеличении U_d насыщение токов завершается, и они снова начинают расти. Через эти точки перехода проведена правая граница.

ВАХ остальных транзисторов были подобны. Основное отличие состояло в том, что у двух из них правая граница была сдвинута вправо и начиналась с $U_d \approx 2$ В.

3. Механизм насыщения токов стока

На рис. 2а изображен упрощенный поперечный разрез симметричного AlGaN/GaN транзистора, у которого затвор расположен посередине между истоком. Источники питания к нему не подключены, транзистор находится в равновесном термодинамическом состоянии. В поверхностном слое GaN находится канал с равномерно распределенной плотностью двумерного электронного газа. Толщина канала символизирует плотность электронов: чем толще канал, тем больше плотность. Электроны канала уравнивают положительный поляризационно-индуцированный заряд, расположенный у гетерограницы в слое AlGaN. Полагаем, что сопротивление контактов и участков, соединяющих канал транзистора с выводами стока и истока, а также сопротивление самого канала равны нулю. В этом случае диэлектрик AlGaN оказывается в ящике, стенки которого и основание, проходящее по дну канала, можно считать металлическими.

Подадим на затвор отрицательное напряжение $U_g < 0$. Между затвором и ящиком возникают электрические (материнские) поля, см. рис 2b, которые поляризуют диполи и домены в слое AlGaN. На поляризацию доменов затрачивается энергия, расходуемая на механическую перестройку их внутренней структуры [3, 4]. С увеличением $|U_g|$ материнские поля возрастают, а плотность электронов в канале снижается, особенно в подзатворной области, расстояние от которой до затвора меньше. В местах пониженной плотности ящик утрачивает металлические свойства, и напряженность исходящих оттуда полей снижается. При некотором значении $U_g = U_t$ электроны из подзатворной области канала исчезнут, с ними исчезнут и материнские поля вертикально направленные к затвору. Будут превалировать поля с явно выраженными горизонтальными составляющими. Описанная картина сложна.

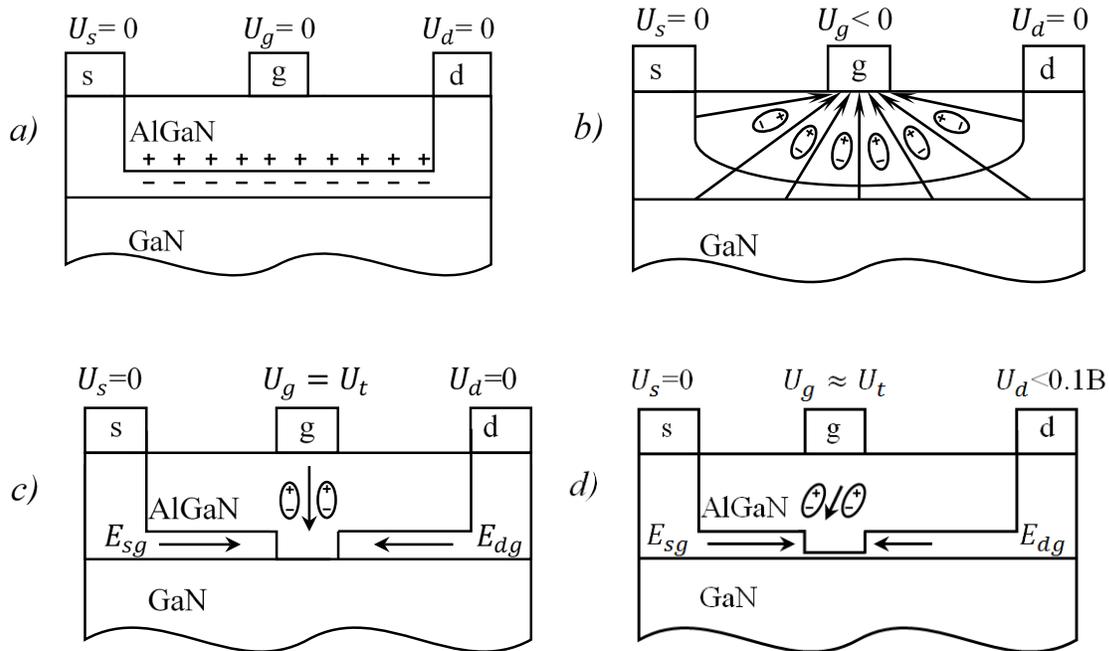


Рисунок 2. Конфигурация полей: Симметричный транзистор: *a*- термодинамическое состояние; *b*- при включении затворного напряжения; *c*- модель симметричного транзистора. *d*- реальный транзистор

На рис. 2с приведена упрощенная модель. Длина перекрытия канала полагается равной длине затвора. Горизонтальные составляющие напряженности материнских полей объединены и размещены в канале по левую и правую стороны от перекрытия. Их значения определяются формулами $E_{sg} = U_g / L_{sg}$ и $E_{dg} = U_g / L_{dg}$, где L_{sg} и L_{dg} - расстояния от границ затвора до границ канала. У симметричного транзистора эти расстояния равны, поэтому $E_{sg} = E_{dg}$. Все поляризованные полем диполи и домены, находящиеся в слое AlGaIn, объединим в коллективный домен и расположим его между затвором и каналом: без учета такого коллективного образования физика явлений будет не полной. На рис. 2с этот домен условно представлен парой диполей и коллективным вектором поляризации, расположенным между ними. Этот коллективный вектор в первом приближении направлен противоположно коллективному вектору материнских полей. На работу транзистора влияют оба вектора, а точнее – влияет вектор, который равен разности двух коллективных векторов.

Перейдем к реальному транзистору, у которого затвор находится на своем месте и $L_{sg} < L_{dg}$. На рис. 2d представлено состояние, характерное для ВАХ, измеренной при $U_g = -3$ В, когда канал почти перекрыт, а напряжение на стоке $U_d = U_{d1} = 0,1$ В такое же, как на левой границе области насыщения. Модули продольных полей в канале

$$E_{sg} = -U_g / L_{sg} \quad \text{и} \quad E_{dg} = (U_{d1} - U_g) / (L_0 - L_{sg}). \quad (1)$$

Здесь $L_{dg} = L_0 - L_{sg}$, где $L_0 = L_{sd} - L_g$ - длина канала L_{sd} без длины затвора L_g ; у обследуемых транзисторов $L_0 = 4,3$ мкм. Поскольку $L_{sg} < L_{dg}$, а $U_{d1} \ll |U_g|$, то выполняется неравенство $E_{sg} > E_{dg}$, при выполнении которого коллективный вектор поляризации повернут в сторону истока. Чем больше отклонение, тем меньше вертикальная составляющая вектора, тем больше электронов под затвором и больше ток стока. Следовательно, управляя углом наклона коллективного вектора можно управлять током стока.

Полагаем, что именно с граничного напряжения $U_{d1} = 0,1$ В начинается эффективный поворот вектора, открывающий область насыщающихся токов. При дальнейшем увеличении U_d этот вектор, поворачиваясь в сторону стока, будет выдавливать электроны из подзатворной области, пока не станет вертикально. Согласно модели, это должно произойти на правой границе при стоковом напряжении $U_{d2} = 1$ В и равенстве полей $E_{sg} = E_{dg}$, которое имеет вид

$$-U_g / L_{sg} = (U_{d2} - U_g) / (L_0 - L_{sg}).$$

Из него находим расстояние $L_{sg} = -U_g L_0 / (U_{d2} - 2U_g)$ между истоком и затвором, а затем расстояние $L_{dg} = L_0 - L_{sg}$ между затвором и стоком. Таким образом, размеры транзистора оказываются связаны с электрическими параметрами на границах области насыщающихся токов.

Перейдем к оценкам. Подставив в приведенные формулы численные значения $U_g = -3$ В, $U_{d1} = 0,1$ В, $U_{d2} = 1$ В, $L_0 = 4,3$ мкм, получим $L_{sg} = 1,84$ мкм, $L_{dg} = 2,46$ мкм. Затвор оказался смещен в сторону стока на 0,29 мкм, но находится в пределах допустимой

погрешности, которая равна ± 0.5 мкм. Продольные поля (1) на левой границе $E_{sg} = 16.3$ кВ/см, $E_{dg} = 12.2$ кВ/см, их отношение $k = 1.34$.

У транзистора №2 пороговое напряжение $U_t \approx -4.2$ В на треть больше, чем у №1, и его нижняя ВАХ, принадлежащая области наклонно-параллельных токов, измерена при затворном напряжении $U_g = -3.5$ В, которое по модулю на полвольта больше, чем у транзистора №1. Но напряжения на левой $U_{d1} = 0.1$ В и правой $U_{d2} \approx 1.2$ В границах остались практически прежними. Рассчитанные значения $L_{sg} = 1.84$ мкм и $L_{dg} = 2.46$ мкм оказались такими же, как у транзистора №1, поля $E_{sg} = 19.0$ кВ/см и $E_{dg} = 14.6$ кВ/см больше, но отношение $k = 1.3$ почти не изменилось.

У транзисторов №3 и №4 правая граница находится вблизи $U_{d2} \approx 2$ В. У этих транзисторов расстояния $L_{sg} \approx 1.6$ мкм, $L_{dg} \approx 2.7$ мкм оказались другими, поля $E_{sg} = 18.8$ кВ/см, $E_{dg} = 11.1$ кВ/см, отношение $k = 1.7$ возросло.

4. Эволюция при изменении затворного смещения

По мере смещения затворного напряжения к нулю напряженность электрического поля между затвором и каналом снижается, сопротивление подзатворной области и напряженности продольных полей E_{sg} и E_{dg} уменьшаются и ток стока растет; точность формул, выведенных для случая $U_g \approx U_t$, снижается. Это согласуется с [4], где пришли к близкому выводу.

После пересечения стоковым напряжением U_d правой границы начинается область нарастающих токов, которые по мере возрастания U_d и уменьшения $|U_g|$ все больше прирастают не столько за счет числа электронов, сколько благодаря увеличению дрейфовой скорости. При полях $E_d = U_d / L_g \geq 100$ кВ/см дрейфовая скорость стремится к насыщению, и приращение тока снижается. Могут влиять и другие факторы, например, температура.

При смещении затворного напряжения вплотную к пороговому значению U_t наблюдается иная картина. При малых значениях U_d и $U_g \approx U_t$ ток стока слабо прирастает за счет электронов, а при больших U_d резко растет из-за большой дрейфовой скорости. Действительно, из рис. 1 видно, что скорость приращения токов стока в области затворных смещений $U_g < -3$ В особенно велика.

5. Заключение

Двойной логарифмический масштаб позволяет с одинаковой погрешностью анализировать связь между крупными и мелкими деталями ВАХ, которые различаются на порядки величин. Это позволило понять физику явлений, ответственных за формирование вольтамперных характеристик у GaN/AlGaN транзисторов, не имеющих донорного легирования. Показано, что у таких транзисторов помимо спонтанной и пьезоэлектрической поляризации кристаллической решетки немаловажную роль играет, возникающая под воздействием приложенных напряжений, электрическая поляризация диполей и доменов, находящихся в подзатворной области слоя AlGaN. Управляя углом

поворота коллективного вектора, который учитывает поляризацию доменов, можно управлять током стока транзистора.

Список литературы

1. Ковалев А.Н. Транзисторы на основе полупроводниковых гетероструктур. – М.: МИСиС, 2011.
2. Fleetwood . D.M. Total-Ionizing-Dose Effects, Border Traps, and 1/f Noise in Emerging MOS Technologies // IEEE Nuclear and Plasma Sciences Society. – 2020. – Т. 67. – № 7. – С. 1216.
3. Шутый А.М.. Равновесные конфигурации и фазовые переходы в дипольных решетках.// Физика твердого тела. 2013. – Т. 55. – № 11. – С. 2155.
4. Karumuri N, Sreenidhi T, DasGupta N., DasGupta A. An analytical charge control model for AlGaIn/GaN HEMT including the gate bias dependence on polarization charge.// Proc. International Conference on Emerging Electronics, Mumbai, India – 2012