

ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СЛОИ И МНОГОСЛОЙНЫЕ КОМПОЗИЦИИ

EPITAXIAL LAYERS AND MULTILAYERED COMPOSITIONS

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2019. Т. 22, № 3. С. 202—211.
DOI: 10.17073/1609-3577-2019-3-202-211

УДК 621.315.592:621.315.61

Пленки ALD Al_2O_3 , SiN_x и SiON в качестве пассивирующих покрытий в $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ HEMT

© 2019 г. К. Л. Енишерлова[§], Э. М. Темпер, Ю. В. Колковский, Б. К. Медведев, С. А. Капилин

АО «НПП «Пульсар»,
Окружной проезд, д. 27, Москва, 105187, Россия

Аннотация. В полевых транзисторах на основе широкозонных нитридных гетероструктур широко используются диэлектрические слои в качестве как одного из основных элементов в активных областях приборов, так и пассивирующих слоев. К диэлектрикам предъявляются жесткие требования по высокой диэлектрической проницаемости, большой ширине запрещенной зоны, сплошности покрытия. Кроме того, пленки должны выдерживать высокие электрические поля и иметь низкую плотность поверхностных состояний на границе диэлектрик/полупроводник. Для этих целей в качестве эффективных покрытий обычно используются низкотемпературные пленки, выращенные с помощью плазмохимического осаждения из газовой фазы, атомно-слоевого осаждения (ALD) и плазменно-стимулированного осаждения. Для гетероструктур $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ наиболее перспективными и чаще всего используемые являются пленки ALD Al_2O_3 , SiN_x (Si_3N_4), SiON , ALD AlN .

Исследовано влияние пассивирующих покрытий ALD Al_2O_3 , SiN_x и SiON разной толщины на изменение заряда и плотности состояний гетероструктур $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$. Электрофизические параметры структур оценивались с помощью $C-V$ -характеристик, измеренных на разных частотах, и $I-V$ -характеристик. На основании рассмотренных зонных диаграмм структур при разном управляющем напряжении и оценки элементного состава пленок методом Оже-спектроскопии показано, что причиной образования большого положительного заряда при нанесении пленок ALD Al_2O_3 и SiN_x является возникновение дополнительного пьезоэлектрического заряда в буферном слое AlGaIn . Показано, что использование пленок SiON с концентрацией кислорода в них более 3 % не приводит к формированию дополнительного положительного заряда, но может вызывать флуктуации тока при измерении $I-V$ -характеристик. Рассмотрен возможный механизм транспорта носителей в области пространственного заряда, приводящий к таким флуктуациям.

Ключевые слова: гетероструктура $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$, пассивирующее покрытие, фиксированный заряд, зонная диаграмма, спонтанная и пьезополяризация, донорно-подобные центры, прыжковая проводимость, поверхностные состояния

Введение

В полевых транзисторах на основе широкозонных нитридных гетероструктур широко используются диэлектрические слои в качестве как одного из основных элементов в активных областях приборов (в частности в MISHFET и HEMT с утопленной конструкцией затвора, MOS-конструкция затвора), так и пассивирующих слоев. К диэлектрикам предъявляются жесткие требования по высокой диэлектрической проницаемости ϵ , большой ширине запрещенной зоны E_G , сплошности покрытия. Кроме того, пленки должны выдерживать высокие электриче-

ские поля и иметь низкую плотность поверхностных состояний на границе диэлектрик/полупроводник. Для этих целей в качестве эффективных покрытий обычно используются низкотемпературные пленки, выращенные с помощью плазмохимического осаждения из газовой фазы (PECVD), атомно-слоевого

Енишерлова Кира Львовна[§] — доктор техн. наук, начальник лаборатории, e-mail: Enisherlova@pulsarpp.ru; **Темпер Элла Моисеевна** — старший научный сотрудник; **Колковский Юрий Владимирович** — доктор техн. наук, заместитель Генерального директора; **Медведев Борис Константинович** — старший научный сотрудник; **Капилин Семен Андреевич** — инженер.

[§] Автор для переписки

осаждения (ALD) и плазменно-стимулированного осаждения (PEALD). Для гетероструктур AlGaN/GaN наиболее перспективными и чаще всего используемыми являются следующие пленки: ALD Al_2O_3 ($E_G = 6+8$ эВ, $\epsilon = 8+10$), SiN_x (Si_3N_4 , $E_G = 5+6$ эВ, $\epsilon = 7+7,2$), SiON, ALD AlN ($E_G = 6$ эВ, $\epsilon = 8+9$) [1—4]. Несмотря на наличие ряда работ по анализу поверхностных состояний на границе диэлектрик/AlGaN и имеющиеся теоретические расчеты [3—5] в каждом конкретном случае остается ряд нерешенных проблем, связанных с границей раздела изолятор/AlGaN. Проблема усложняется тем, что при рассмотрении таких систем и, например, определении плотности поверхностных состояний на границе изолятор/AlGaN необходимо учитывать присутствие дополнительной границы: AlGaN/GaN, которая дает свой определенный вклад. Кроме того, необходимо учитывать большое количество переменных, которые могут влиять на состояние на границе раздела: толщина пленки изолятора, концентрация алюминия в слое AlGaN, соотношение элементов в диэлектрических пленках. Поэтому целью данной работы были экспериментальные исследования изменения заряда и плотности состояний на границе изолятор/AlGaN при использовании пленок Al_2O_3 , SiN_x и SiON разной толщины для выбора оптимального варианта диэлектрика для AlGaN/GaN/SiC HEMT.

Теоретическая часть

Измерение вольт-фарадных характеристик на данный момент продолжает оставаться наиболее эффективным методом контроля электрофизических особенностей AlGaN/GaN-гетероструктур [6—8] при оценке величины заряда и плотности граничных состояний.

При формировании пассивирующих покрытий с использованием большинства перечисленных выше пленок в системе диэлектрик/AlGaN возникает заряд [3, 5, 9], приводящий к параллельному сдвигу C—V-кривых по оси $x(V)$ в сторону отрицательных

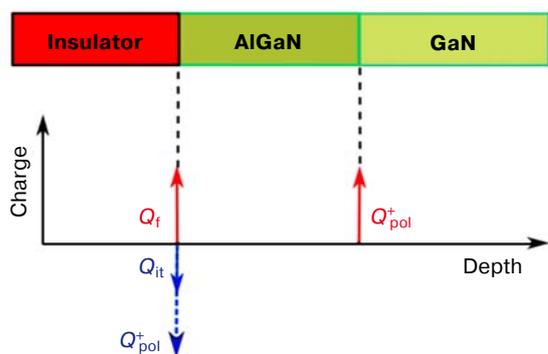


Рис. 1. Распределение зарядов на границах гетероструктуры ALD Al_2O_3 /AlGaN/GaN [2]

Fig. 1. Charge distribution at the boundaries of the ALD Al_2O_3 /AlGaN/GaN heterostructure [2]

или положительных значений и изменению наклона кривых при переходе из обогащения в обеднение. При этом величина сдвига является сложной функцией величины зарядов, имеющих различную природу. Считается, что при нанесении диэлектрических пленок методами PECVD, ALD и PEALD в структурах изолятор/AlGaN/GaN формируются заряды [3]:

- на границе AlGaN/GaN — положительный поляризационный заряд (Q_{pol}^+), возникающий из-за спонтанной поляризации этих двух материалов, а также пьезоэлектрической поляризации в пленке AlGaN;

- на границе изолятор/AlGaN — три вида заряда: Q_f — фиксированный, как правило, положительный заряд, Q_{it} — заряд ловушечных состояний на границе диэлектрик/AlGaN, Q_{pol}^- — отрицательный поляризационный заряд, как результат спонтанной поляризации и пьезо-поляризации слоя AlGaN (рис. 1).

Несмотря на некоторые конкретные данные до конца не ясно, что такое природа фиксированного заряда и почему для большинства пленок заряд положительный. Есть несколько гипотез о том, что является причиной возникновения положительного фиксированного заряда. Некоторые исследователи связывают этот заряд просто с зарядом на границе раздела, утверждая, что этот заряд может формироваться, например, из-за возникновения связей Al—O на границе с изолятором, поскольку кислород всегда присутствует на поверхности гетероструктур [10]. В этом случае фиксированный заряд должен был бы расти с ростом мольного содержания Al, что противоречит экспериментальным данным [8]. Другая гипотеза заключается в том, что фиксированный заряд определяется состояниями на поверхности слоя AlGaN, которые представляют собой ионизированные донорно-подобные ловушечные центры. За эти центры отвечают дефекты, формирующиеся на поверхности AlGaN при росте эпитаксиальных слоев гетероструктур. Третья уточняющая гипотеза состоит в том, что фиксированный заряд связан с большим количеством дефектов, возникающих непосредственно на границе изолятор/AlGaN. При этом в работе [5] конкретизируется, что фиксированный заряд определяется зарядом ионизированных состояний, расположенных между дном зоны проводимости слоя AlGaN и зоной проводимости диэлектрика, что позволяет рассчитать заряд на границе раздела через среднюю плотность состояний. Таким образом, из этих гипотез следует, что фиксированный заряд определяется, по существу, зарядом ионизированных состояний на границе раздела диэлектрик/AlGaN.

В других работах утверждается, что возникновение положительного фиксированного заряда в системах диэлектрик/полупроводник связано с

возникновением упругих напряжений в слое AlGaIn при нанесении пленок диэлектрика, приводящих к образованию дополнительного пьезозаряда [11]. Известно, что в слое AlGaIn исходных гетероструктур возникает биаксиальное растягивающее напряжение из-за решеточного несоответствия слоев AlGaIn и GaN [12]. Наносимые диэлектрические пленки сами могут иметь внутренние напряжения. В частности, в пленках SiN_x внутренние напряжения, по данным работы [12], могут достигать 300 МПа, что тоже может приводить к изменению картины напряжений в активном слое AlGaIn. В работе [11] с помощью высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии установлено, что после нанесения слоя SiN_x толщиной 40 нм величина растягивающих напряжений в слое AlGaIn возрастает на 15 %, при этом плотность носителей заряда в канале 2DEG возрастает на 9,5 %.

В работе [3] оценивалась величина фиксированного заряда, в частности для барьера Шоттки на структурах SiN_x/AlGaIn при мольном содержании алюминия 0,26 и толщине барьерного слоя 20 нм. Величина фиксированного заряда, по данным работы [3], составляла $Q_f = (2,76 \pm 2,81) \cdot 10^{-2}$ К/м²; с ростом мольного содержания алюминия эта величина уменьшалась.

По данным работы [2], ловушечные состояния в объеме анализируемых диэлектрических пленок практически отсутствуют, а ловушки располагаются очень близко к границе раздела изолятор/полупроводник. Надо также учитывать, что для широкозонных материалов в основном характерны медленные состояния. У широкозонных материалов эффективность эмиссии электронов из состояний на границе раздела в зону проводимости ограничена. Временная постоянная τ для состояний вблизи середины запрещенной зоны, например, для AlGaIn при мольном содержании алюминия 0,3 и комнатной температуре составляет 10^{10} — 10^{20} с [2], и возбудить электроны с глубоких уровней простым смещением напряжения достаточно сложно.

Как указывалось выше, наиболее перспективными диэлектрическими материалами для пассивации структур AlGaIn/GaN являются пленки ALD Al₂O₃, SiN_x, S₃N₄. В частности, в работе [2], анализировались особенности C—V- и I—V-характеристик тестовых диодов на структурах с пленками ALD Al₂O₃: (Ni/ALD Al₂O₃/AlGaIn/GaN). Показано, что граница раздела ALD Al₂O₃/AlGaIn имеет высокую плотность состояний. Расчетным путем получены плотности состояний акцепторного типа $D_{it1}(E) = 1,3 \cdot 10^{13}$ см⁻² и донорного типа $D_{it2}(E) = 2,5 \times 10^{13}$ см⁻² на границе раздела. Энергетические уровни донорно-подобных дискретных состояний (скорее всего, азотно-вакансионных комплексов) в запрещенной зоне — $E_D = E_C - 0,37$ эВ, а уровни акцепторных состояний (скорее всего, вакансий

галлия [15—17]) — $E_A = E_V + 1,0$ эВ. В работе [13] утверждается, что самый большой фиксированный положительный заряд на границе диэлектрик/AlGaIn характерен для диэлектриков SiN_x.

Таким образом, несмотря на большой объем экспериментальных материалов, многие вопросы, связанные с рассмотренными выше пассивирующими покрытиями, требуют проведения дальнейших исследований для уточнения:

- какой механизм ответственен за образование и распределение заряда в системе диэлектрик/AlGaIn/GaN;
- как особенности процесса формирования диэлектрических пленок могут влиять на электрофизические параметры границы раздела диэлектрик/AlGaIn/GaN.

Методика эксперимента

Влияние особенностей формирования пленок диэлектрика на электрические параметры системы диэлектрик/AlGaIn/GaN исследовали для гетероструктур AlGaIn/GaN, выращенных методом MOCVD на сапфировых подложках с толщиной слоя AlGaIn 20 нм и мольным содержанием Al 0,26—0,28. Анализировались пленки, полученные двумя низкотемпературными способами: PECVD и ALD. При использовании метода PECVD исследовались пленки, выращенные при 200—250 °С разного состава. Анализировались пленки Al₂O₃, Si₃N₄, SiN_x, а также SiON.

Пленки Al₂O₃ формировались методом ALD с использованием системы ALD R200 (Picosun). Перед напылением гетероструктуры очищались в растворе HF в течение 5 мин и обрабатывались в ультразвуковой установке в деионизованной воде. В качестве прекурсоров использовались вода и триметилалюминий (ТМА), в качестве газа-носителя — N₂. Водяной пар и ТМА попеременно инжектировались в реакторную камеру в пульсирующем режиме, формируя слой за слоем пленку Al₂O₃. Время продувки после импульса ТМА составляло 8 с, а водяного пара — 10 с. Продолжительность импульсов напуска в обоих случаях — 0,1 с. Синтез проводился в реакторе при температуре 240 °С. Скорость роста пленки в этих условиях составляла 11 нм/цикл. По данным работ [2, 14], такие пленки имеют ширину запрещенной зоны 6—7 эВ и сдвиг проводящей и валентной зоны между Al₂O₃ и AlGaIn 0,2 эВ.

Остальные пленки формировались с использованием техники PECVD. Осаждение пленок SiN_x проводили в установке Plasmalab System 100 ICP180 фирмы Oxford Instruments Plasma Technology с источником ICP. К источнику ICP был подключен ВЧ-генератор с частотой 13,56 МГц для создания плотной плазмы, другой ВЧ-генератор мог быть подключен к подложкодержателю для независимой регулиров-

ки потенциала смещения на подложке. Мощность ВЧ-смещения держали на минимальном уровне 1,0 Вт, чтобы не повредить поверхность полупроводника из-за ионной бомбардировки. Высокая скорость диссоциации в источнике ICP позволила использовать газ N_2 вместо NH_3 , что дало возможность получить пониженную концентрацию водорода в рабочей камере и, следовательно, в растущей пленке. Подача газов SiH_4 и N_2 в камеру была раздельная: азот входил в камеру сверху источника ICP, а моносилан через распределительное кольцо, чтобы приблизить газ SiH_4 и его реакцию с азотом к подложке. Температура осаждения в исходном режиме осаждения, наиболее часто используемом, составляла 200 °С.

Толщину d и коэффициент преломления n покрытия измеряли с помощью эллипсометра на контрольных кремниевых подложках.

Емкостные измерения проводились на установке Semiconductor Measurement Sistem MDC CSM/Win, $C-V$ -характеристики измерялись на частотах $f = 1$ МГц, 100 кГц и 10 кГц. Измерения проводились с помощью ртутного зонда, при этом площадь измерительного ртутного зонда составляла $0,005 \text{ см}^2$, второй контактный зонд имел кольцевую форму и площадь, в 38 раз превышающую площадь измерительного зонда. Параллельно снимались $I-V$ -характеристики при различных скоростях развертки (от 0,1 до 0,9 с). Измерения $C-V$ -характеристик проводились по последовательной (C_s-R_s) схеме замещения.

Методом Оже-спектроскопии определялся элементный состав пленок Si_3N_4 и $SiON$, осажденных на Si пластину-спутник; оценивалось процентное соотношение элементов в пленках.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2—4 показаны полученные $C-V$ -характеристики структур при использовании пленок разной толщины анализируемых изоляторов. Как видно из рис. 2 и 3, при нанесении таких материалов, как ALD Al_2O_3 (коэффициент преломления $n = 1,62-1,65$) и Si_3N_4 ($n = 1,95-2,02$), наблюдаются характерные сдвиги $C-V$ -кривых в сторону отрицательных значений, причем с ростом толщины

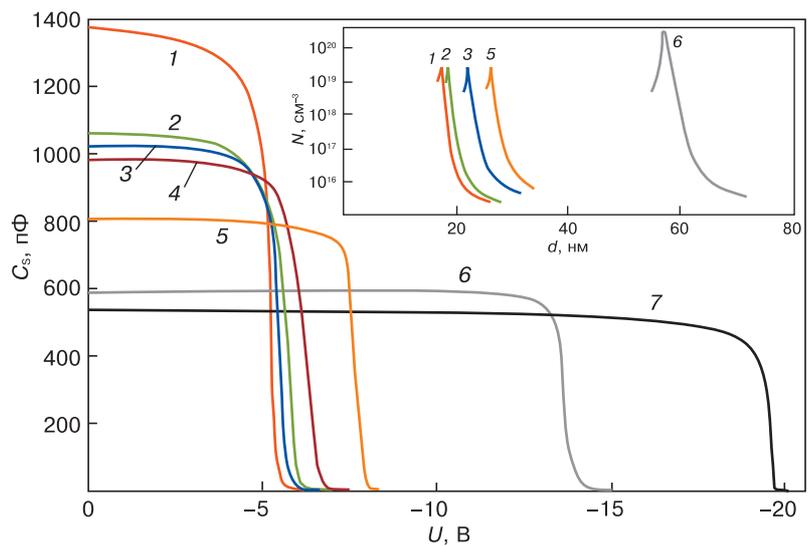


Рис. 2. $C-V$ -характеристики гетероструктур AlGaIn/GaN до пассивации (1) и после нанесения покрытия ALD Al_2O_3 разной толщины от 5 до 43 нм (2—7). Вставка — профили концентрации свободных носителей по глубине при разной толщине пленок

Fig. 2. $C-V$ characteristics of AlGaIn/GaN heterostructures before passivation (1) and after deposition of ALD Al_2O_3 coatings of various thicknesses from 5 to 43 nm (2—7). Inset is depth profiles of free carrier concentration at different film thicknesses

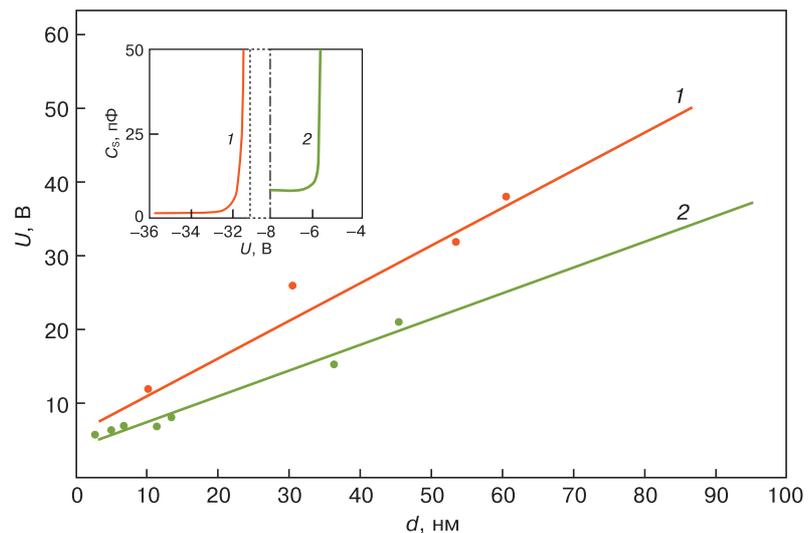


Рис. 3. Зависимости напряжения отсечки ($U_{отс}$) структур диэлектрик/AlGaIn/GaN от толщины пленки диэлектрика: 1 — Si_3N_4 ; 2 — ALD Al_2O_3 . Вставка — участки $C-V$ -характеристик структур диэлектрик/AlGaIn/GaN: 1 — с диэлектриком Si_3N_4 ; 2 — с диэлектриком ALD Al_2O_3

Fig. 3. Dependences of the cut-off voltage ($U_{отс}$) of the dielectric/AlGaIn/GaN structures on the dielectric film thickness: (1) Si_3N_4 , (2) ALD Al_2O_3 . Inset is sections of the $C-V$ characteristics of the dielectric/AlGaIn/GaN structures: (1) with Si_3N_4 dielectric, (2) with ALD Al_2O_3 dielectric

пленки величина сдвига напряжения $U_{отс}$ возрастает. Аналогичный эффект наблюдался и в ряде работ, т. е. увеличение толщины пленки приводило, по мнению авторов этих работ, к росту положительного заряда в системе [2, 3]. В случае пленок ALD Al_2O_3 этот сдвиг происходит параллельно без изменения наклона участка кривых при переходе из состояния обогащения в состояние обеднения (см. рис. 2). При нанесении пленок Si_3N_4 наблюдался тот же эффект с

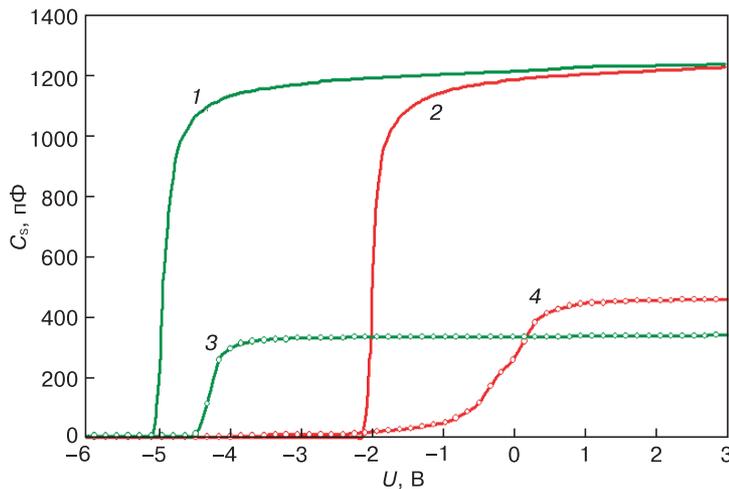


Рис. 4. C – V -характеристики исходных гетероструктур AlGaIn/GaN, с различным напряжением отсечки до (1, 2) и после (3, 4) нанесения пленок SiON разной толщины: 3 — 80 нм; 4 — 40 нм. Частота измерения $f = 10$ кГц

Fig. 4. C – V characteristics of AlGaIn/GaN heterostructures before (1, 2) and after (3, 4) deposition of SiON films of different thicknesses: (3) 80 nm, (4) 40 nm. Measurement frequency $f = 10$ kHz

незначительным изменением наклона участка кривых перехода из состояния обогащения в обеднение с ростом толщины пленки (см. рис. 3, вставка). Однако при изменении состава пленки (с увеличением содержания кислорода в пленках) картина резко изменяется: нанесение пленок, наоборот, приводит к сдвигу кривых в сторону положительных значений (см. рис. 4), или положение напряжения $U_{отс}$ практически не изменяется. Однако при этом наблюдалось резкое изменение угла наклона кривых в области перехода от обогащения к обеднению (см. рис. 4).

Исследование I – V -характеристик гетероструктур с анализируемыми пленками изолятора в сильном обеднении показало, что при нанесении пленок ALD Al_2O_3 и Si_3N_4 характеристики имеют стандартный вид (рис. 5, кривые 1 и 2) с токами утечки $I_{ут} = 10^{-5}$ А при $U = -10$ В. Использование пленок SiON с $n = 1,85 \div 1,88$ практически при тех же толщинах, что и пленки Si_3N_4 , приводило к резкому уменьшению (на несколько порядков) токов утечки ($I_{ут} = 10^{-10}$ А при $U = -10$ В), а также в большинстве случаев — к появлению на кривых характерных флуктуаций тока (рис. 5, кривая 3).

Анализ флуктуаций тока на вольт-амперных характеристиках структур SiON/AlGaIn/GaN показал, что изменение скорости развертки изменяет наблюдаемую картину: наиболее отчетливо и ярко флуктуации наблюдаются при скорости развертки 0,1 с, а уменьшение скорости приводит

к сглаживанию флуктуаций. Сопоставление C – V - и I – V -характеристик свидетельствует о том, что флуктуации наблюдаются при напряжениях, соответствующих C_{max} (рис. 6). Отжиг структур при $T = 700$ °С приводит к уменьшению амплитуды флуктуаций (рис. 6, кривые 4 и 5). Кроме того, отжиг этих структур при $T = 700$ °С в среде азота обуславливает значительный сдвиг C – V -характеристик по оси x в сторону отрицательных значений (от $U = -6$ В до $U > -40$ В) без изменения значения емкости C_{max} .

Проведенный методом Оже-спектроскопии анализ по глубине используемых пленок Si_3N_4 и SiN_x показал, что только

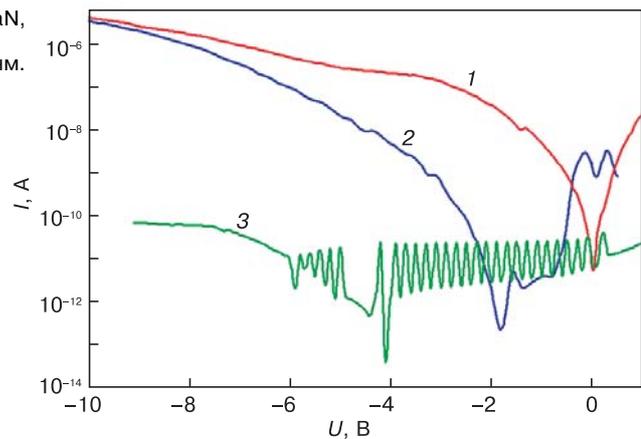


Рис. 5. I – V -характеристики в области обеднения для структур диэлектрик/AlGaIn/GaN: 1 — ALD Al_2O_3 ; 2 — Si_3N_4 ; 3 — SiON

Fig. 5. I – V characteristics in the depletion region for dielectric/AlGaIn/GaN structures: (1) ALD Al_2O_3 , (2) Si_3N_4 , (3) SiON

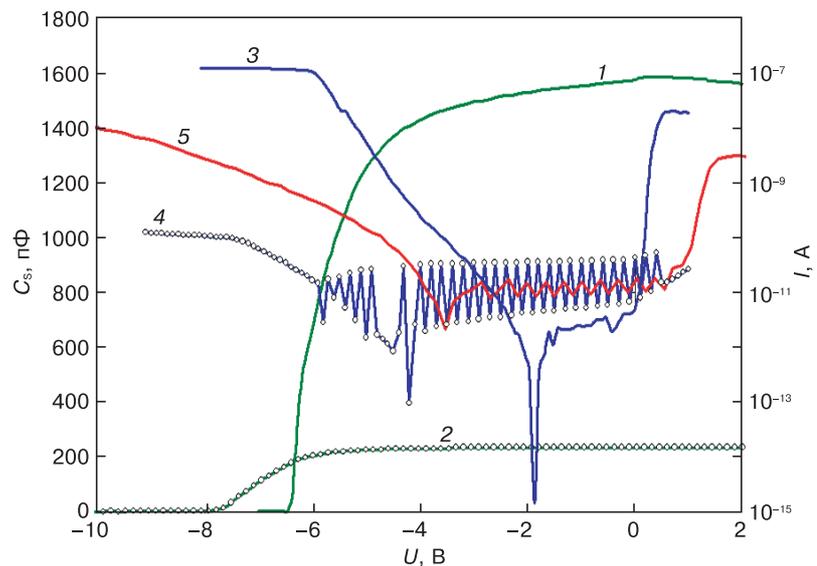


Рис. 6. C – V - (1, 2) и I – V - (3–5) характеристики гетероструктур AlGaIn/GaN с пленкой SiON: 1, 3 — до нанесения пленки SiON; 2, 4 — после нанесения пленки SiON; 5 — после нанесения пленки SiON и отжига при $T = 700$ °С

Fig. 6. (1, 2) C – V and (3–5) I – V characteristics of AlGaIn/GaN heterostructures with SiON film: (1, 3) before applying the SiON film, (2, 4) after deposition of the SiON film, (5) after deposition of a SiON film and annealing at $T = 700$ °С

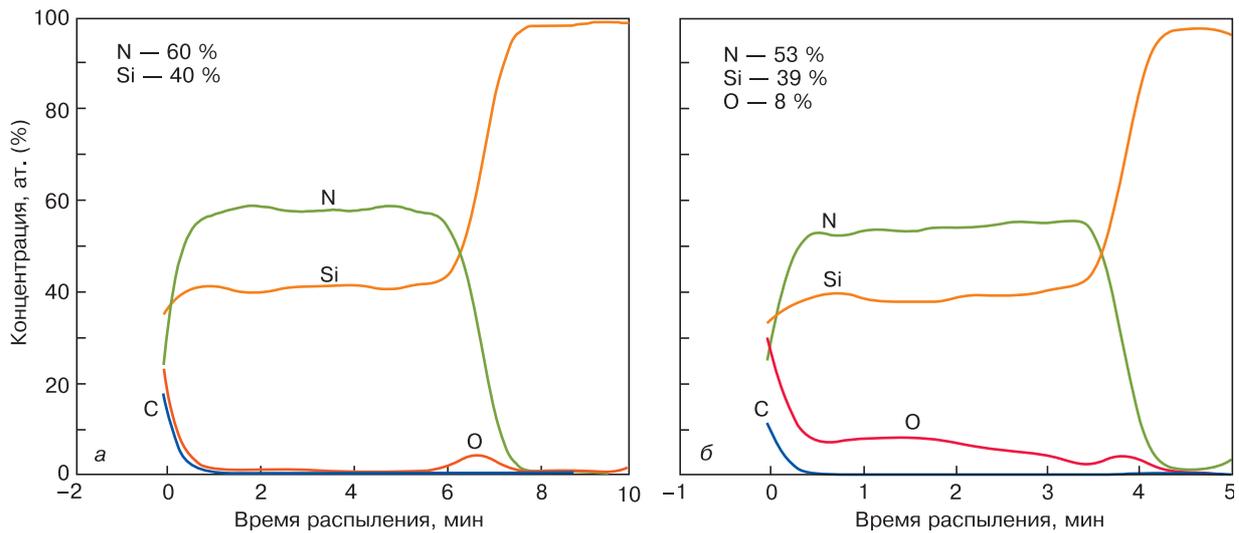


Рис. 7. Распределения концентрации примесей по глубине в структурах диэлектрик/Si, полученные методом Оже-спектроскопии: а — с диэлектриком SiN_x; б — с диэлектриком SiON

Fig. 7. Distributions of impurity concentration in depth in the structures of dielectric/Si, obtained by Auger electron spectroscopy: (a) with SiN_x dielectric, (б) with SiON dielectric

в пленках SiN_x присутствует кислород с изменяющейся концентрацией по глубине от 8 до 3 % (рис. 7), т. е. это пленки SiN_x с повышенным содержанием кислорода (SiON), что подтверждается данными эллипсометрии (коэффициент преломления у этих пленок $n = 1,85 \div 1,88$).

Рассмотрим изменение зонной диаграммы анализируемой структуры при изменении управляющего напряжения (рис. 8). Необходимо сразу отметить, что при этом изменение концентрации электронов происходит главным образом в канале двумерного газа, т. е. на границе AlGaN/GaN. При сдвиге управляющего напряжения в отрицательную сторону глубина ямы на границе AlGaN/GaN и концентрация носителей в канале уменьшаются (рис. 8, а—в). При этом условия эмиссии электронов с ловушечных уровней облегчаются, т. е. с части этих уровней происходит эмиссия электронов. Поскольку временная постоянная состояний вблизи середины запрещенной зоны очень большая при $T_{ком}$ (10^{20} с), то эмиссия электронов с глубоких уровней вблизи середины запрещенной зоны даже при больших отрицательных смещениях маловероятна. Таким образом, при больших отрицательных смещениях может формироваться фиксированный заряд Q_f , который, по-видимому, связан с зарядом медленных состояний.

При сдвиге управляющего напряжения в сторону положительных значений ($U > 0,5$ В) на C—V-характеристиках анализируемых гетероструктур с диэлектриками Si₃N₄ и ALD Al₂O₃ наблюдается гистерезис емкости. Поскольку в этом диапазоне напряжений область пространственного заряда (ОПЗ) резко сокращается, заряд в канале может определяться, главным образом, зарядом на границе диэлектрик/AlGaN (рис. 8, г). Очевидно, на-

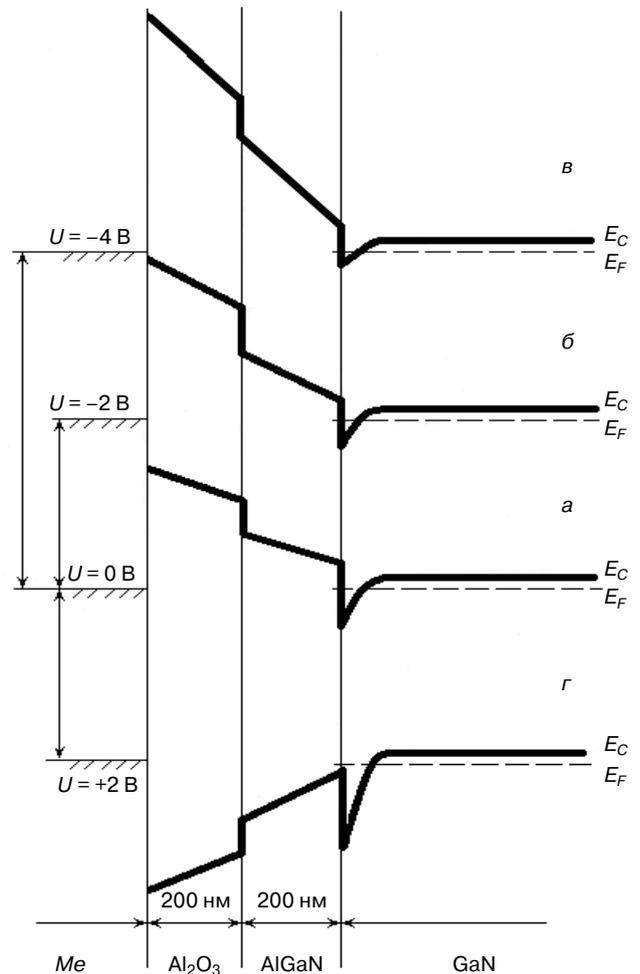


Рис. 8. Зонные диаграммы гетероструктуры ALD Al₂O₃/AlGaN/GaN при разном управляющем напряжении U, В: а — 0; б — -2; в — -4; г — +2

Fig. 8. Band diagrams of the ALD Al₂O₃/AlGaN/GaN heterostructure at different control voltages U, V: (a) 0, (б) -2, (в) -4, (г) +2

блюдающийся на C — V -кривой гистерезис связан с дефектами на границе с диэлектриком и, возможно, в слое AlGaIn. Приведенные рассуждения, вероятно, объясняют результаты, полученные для пленок изолятора ALD Al_2O_3 и Si_3N_4 . Однако при использовании пленок SiON картина изменяется: в обеднении наблюдается уменьшение положительного заряда в структуре (см. рис. 4).

Как показано в ряде работ [11, 13], изменение величины фиксированного заряда в системе диэлектрик/AlGaIn/GaN при изменении состава и толщины пленки может быть связано с изменением как упругих напряжений в слое AlGaIn (пьезоэлектрический заряд, $Q_{\text{пол}}^-$), так и состояний на границе диэлектрик/AlGaIn. Как известно, для гетероструктур AlGaIn/GaN область пространственного заряда уже при $U = 0$ практически распространяется до канала двумерного газа.

На C — V -характеристиках о фиксированном заряде можно судить по значению ΔV на участке, где измеряемая емкость $C_{\text{изм}}$ практически не меняется при отрицательном смещении (см. рис. 2). Из экспериментальных данных получено, что при увеличении толщины диэлектрика в случае пленок ALD Al_2O_3 и Si_3N_4 (см. рис. 2 и 3) происходит рост фиксированного заряда. При этом надо учитывать, что с учетом схемы замещения для этого случая можно использовать упрощенную схему с двумя емкостями, включенными последовательно [15], т. е.

$$1/C_{\text{изм}} = 1/C_{\text{исх}} + 1/C_{\text{ок}},$$

а сам фиксированный заряд в первом приближении может быть определен как $Q_f = C_{\text{диэл}}\Delta V$, где ΔV — участок, где $C_{\text{изм}} = \text{const}$ при изменении напряжения измерения. Как видно из рис. 2, с ростом толщины пленки происходит рост как фиксированного заряда, так и концентрации электронов в канале 2DEG (см. рис. 2, вставка). При этом, как видно из рис. 2 и 3 (вставка), нанесение пленок ALD Al_2O_3 и пленок Si_3N_4 указанных толщин не приводит к изменению плотности быстрых состояний — не изменяется угол наклона кривых C — V к оси x . Авторы работы [16] считают, что по наклону C — V -кривых проблематично судить о плотности граничных быстрых состояний, но поскольку речь идет об относительном изменении угла наклона кривых по сравнению с углом наклона C — V -кривых исходных гетероструктур, то, по-видимому, по изменению наклона косвенно можно судить об изменении плотности быстрых состояний вблизи границы AlGaIn/GaN. Что касается пленок SiON, то, как видно из рис. 4, происходит изменение состояний на границе раздела AlGaIn/GaN, о чем свидетельствует изменение наклона C — V -характеристики в области, близкой к сильному обеднению в структурах с SiON-диэлектриком.

Таким образом, из сказанного выше следует:

- характер поведения систем диэлектрик(Si_3N_4)/AlGaIn/GaN при использовании двух различных методов нанесения пленок (использование плазмы (PECVD) или послойное впрыскивание водяного пара в камеру (ALD)) с позиции возникновения фиксированного заряда практически одинаковый, даже несмотря на использование различных прекурсоров в этих двух технологических процессах;

- принципиально другая картина наблюдается при использовании диэлектрика SiON в отличие от пленок Si_3N_4 и ALD Al_2O_3 — отсутствие сдвига C — V -кривых в сторону отрицательных значений. То есть при нанесении пленок SiON положительный фиксированный заряд в системе SiON/AlGaIn/GaN не образуется, однако, увеличивается наклон C — V -кривых в области перехода от обогащения к обеднению.

Из анализа Оже-спектров исследованных структур диэлектрик/AlGaIn/GaN можно предположить, что определяющую роль в формировании заряда в структуре SiON/AlGaIn/GaN играет кислород, которого в пленке SiON более 3 %. Анализ спектров показал, что, скорее всего, на формирование заряда оказывает влияние не кислород на границе раздела SiON/AlGaIn, поскольку его концентрация на границе диэлектрик/AlGaIn/GaN для пленок Si_3N_4 и SiON практически одинакова. Можно предположить, что избыток кислорода в пленке приводит к изменению ее плотности, а это, в свою очередь, обуславливает уменьшение напряжений в слое AlGaIn, т. е. уменьшение пьезозаряда в системе диэлектрик/полупроводник. Влияние кислорода на плотность решетки Si_3N_4 наблюдалась авторами работы [17] при исследовании керамики Si_3N_4 . Показано, что присутствие кислорода приводит к «размягчению» решетки Si_3N_4 . Кроме того, увеличение угла наклона C — V -кривых на участке перехода в область сильного обеднения для пленок SiON свидетельствует о большей плотности быстрых состояний в структуре SiON/AlGaIn/GaN по сравнению со структурами Si_3N_4 /AlGaIn/GaN и ALD- Al_2O_3 /AlGaIn/GaN.

Избыток кислорода должен приводить к возникновению большего количества достаточно крепких связей Al—O [2]. Однако разница в образовании фиксированного заряда при использовании пленок ALD- Al_2O_3 и SiON при практически одинаковом распределении кислорода на границе этих пленок с барьерным слоем, можно сказать, не связана с образованием кислородных связей на границе раздела в этих двух диэлектрических пленках.

Согласно результатам анализа Оже-спектров, пик O_2 на границе диэлектрик/AlGaIn у образцов с пленками ALD- Al_2O_3 и SiON практически одинаковый, а содержание O_2 в объеме самой пленки SiON резко увеличивается. На наш взгляд, это косвенное подтверждение того, что основной причиной возникновения большого положительного заряда

в системе диэлектрик/AlGaN/GaN в случае использования пленок ALD-Al₂O₃ и Si₃N₄, скорее всего, является изменение свойств самого диэлектрика, например его плотности. Повышенное содержание кислорода может, как показано в работе [17], приводить к некоторому «размягчению» диэлектрика и, как следствие, к уменьшению упругих напряжений в нижележащем слое AlGaN. Поэтому результаты Оже-спектроскопии, на наш взгляд, могут считаться неким косвенным подтверждением роли упругих напряжений, а следовательно, и пьезоэффекта в изменении электрических свойств структур диэлектрик/AlGaN/GaN (отсутствие сдвига по оси x). Определенный интерес представляют наблюдаемые при снятии I – V -характеристик на образцах SiON/AlGaN/GaN флуктуации тока в области напряжений при переходе из обогащения в обеднение, в частности, на рис. 5 в диапазоне напряжений от 0 до –7 В. При анализе механизма транспорта тока в области обратного смещения, когда электроны «поджаты» к каналу 2DEG, одним из возможных механизмов протекания тока на этом участке может быть прыжковая проводимость.

Наиболее значимым для нитридов является ток генерации–рекомбинации (g – r), который обусловлен захватом и высвобождением свободных носителей заряда ловушками (центрами дефектов). Если центры локализованы в верхней области запрещенной зоны, они захватывают электроны, переходящие или покидающие зону проводимости. Если центры располагаются в нижней половине запрещенной зоны, они захватывают и выбрасывают дырки у края валентной зоны. Электрон может быть захвачен ловушкой в том случае, если ловушка пуста, он также может перейти обратно в зону проводимости. Подобные процессы происходят с дырками и с ловушками, захватывающими дырки.

Одним из возможных механизмов, который играет значительную роль в формировании вольт-амперной характеристики (ВАХ) при обратном напряжении смещения для AlGaN/GaN, является прыжковая проводимость [18]. Ток возникает из-за переходов (прыжков) носителей заряда через ловушки, локализованные в обедненном слое. Причиной данного процесса является взаимодействие фононов и локализованных электронов, волновые функции которых частично перекрываются на пустой ловушке.

Транспорт с участием ловушек в ОПЗ можно рассматривать на основе модели дисперсионного транспорта [19]: электроны на границе нейтральной области с ОПЗ совершают туннельный переход в ближайшую ловушку, а более удаленных достигают путем прыжкового движения по ловушкам. Вблизи края ОПЗ, где $0 < E_t < 0,15$ эВ, присутствует область с высокой локальной прыжковой проводимостью $1 > \sigma_{\text{hop}} > 10^{-7} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$.

При приложении малого переменного напряжения круговой частоты $\omega < 1/\tau_M$ область у края ОПЗ (вблизи $x = w$), где $\omega \tau < 1$ и носители успевают следовать за осциллирующим напряжением, вносит вклад в измеряемую дифференциальную активную проводимость $G_{ac}(\omega)$. Так как по мере удаления от края ОПЗ скорость перескоков из состояний E_t меньше скорости перескоков в эти состояния, возникают осцилляции прыжкового тока, по фазе опережающие напряжение. Но одновременно, благодаря осцилляциям квазиуровня Ферми и заполнению захватывающих центров инжектированными в ОПЗ электронами, инерционно осциллирует и проводимость через ОПЗ, что вызывает осцилляции прыжкового тока, по фазе отстающие от напряжения [20]. Такой механизм транспорта носителей в ОПЗ наблюдается при плотности глубоких центров, полученной при измерениях методом релаксационной емкостной спектроскопии (DLTS), 10^{13} – 10^{14} см^{-3} .

Согласно работе [20], максимальный ток прыжковой проводимости может возникать при электрических полях $E_a < 5 \cdot 10^5 \text{ В/см}$, как и в наших экспериментах, а величины таких токов составляют 10^{-12} – 10^{-13} А , что близко к наблюдаемым экспериментальным данным.

Заключение

Рассмотрены особенности формирования фиксированного заряда на границе раздела диэлектрик/AlGaN/GaN при использовании пленок SiN_x, ALD-Al₂O₃, SiON. Показано, что в отличие от пленок SiN_x и ALD-Al₂O₃ при использовании SiON (концентрация кислорода $\geq 3\%$) в системе диэлектрик/AlGaN/GaN формируется отрицательный фиксированный заряд. Использование пленок SiON дает возможность получать фиксированный заряд, близкий по величине к заряду до осаждения пленки.

На основании экспериментальных результатов сделано предположение, что основной причиной возникновения положительного заряда в структурах с пленками SiN_x и ALD-Al₂O₃ являются упругие напряжения в буферном слое AlGaN.

При использовании пленок SiON, как правило, наблюдаются флуктуации тока на обратной ветви I – V -характеристик, что может быть причиной возникновения шумов приборов, сформированных на таких структурах. Рассмотрен возможный механизм транспорта носителей в области ОПЗ, приводящий к таким флуктуациям.

Показано, что возможен механизм транспорта носителей, основанный на модели дисперсионного транспорта электронов.

Библиографический список

1. Chevtchenko S. A., Reshchikov M. A., Fan Q., Ni X., Moon Y. T., Baski A. A., Morkoç H. Study of SiN_x and SiO₂ passivation of GaN surfaces // J. Appl. Phys. 2007. V. 101, N 11. P. 2740324. DOI: 10.1063/1.2740324

2. Mizue C., Hori Y., Miczek M., Hashizume T. Capacitance–voltage characteristics of Al₂O₃/AlGa_{0.3}N/GaN structures and state density distribution at Al₂O₃/AlGa_{0.3}N Interface // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2011. V. 50, N 2R. P. 021001. DOI: 10.1143/JJAP.50.021001
3. Matys M., Stoklas R., Blaho M., Adamowicz B. Origin of positive fixed charge at insulator/AlGa_{0.3}N interfaces and its control by AlGa_{0.3}N composition // *J. Appl. Phys.* 2017. V. 110, N 24. P. 243505. DOI: 10.1063/1.4986482
4. Geng K., Chen D., Zhou Q., Wang H. AlGa_{0.3}N/GaN MIS–HEMT with PECVD SiN_x, SiON, SiO₂ as gate dielectric and passivation layer // *Electronics*. 2018. V. 7, N 12. p. 416. DOI: 10.3390/electronics7120416
5. Matys M., Adamowicz B., Domanowska A., Michalewicz A., Stoklas R., Akazawa M., Yatabe Z., Hashizume T. On the origin of interface states at oxide/III–nitride heterojunction interfaces // *J. Appl. Phys.* 2016. V. 120, Iss. 22. P. 225305. DOI: 10.1063/1.4971409
6. Shengyin Xie, Jiayun Yin, Sen Zhang, Bo Liu, Wei Zhou, Zhihong Feng. Trap behaviors in AlGa_{0.3}N–Ga_{0.7}N heterostructures by C–V characterization // *Solid–State Electronics*. 2009. V. 53, Iss. 11. P. 1183–1185. DOI: 10.1016/j.sse.2009.08.006
7. Зубков В. И. Диагностика гетероструктур с квантовыми ямами In_xGa_{1–x}As/GaAs методом вольт–фарадных характеристик: разрывы зон, уровни квантования, волновые функции // *Физика и техника полупроводников*. 2007. Т. 41, № 3. С. 331–337. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/6276>
8. Miczek M., Mizue C., Hashizume T., Adamowicz B. Effects of interface states and temperature on the C–V behavior of metal/insulator/AlGa_{0.3}N/GaN heterostructure capacitors // *J. Appl. Phys.* 2008. V. 103, Iss. 10. P. 104510. DOI: 10.1063/1.2924334
9. Arulkumaran S., Egawa T., Ishikawa H., Jimbo T. Characterization of different –Al–content Al_{1–x}Ga_xN/GaN heterostructures and high–electron–mobility transistors on sapphire // *J. Vacuum Science & Technology B*. 2003. V. 21, Iss. 2. P. 888–894. DOI: 10.1116/1.1556398
10. Hashizume T., Hasegawa H. Effects of nitrogen deficiency on electronic properties of AlGa_{0.3}N surfaces subjected to thermal and plasma processes // *Applied Surface Science*. 2004. V. 234, Iss. 1–4. P. 387–394. DOI: 10.1016/j.apsusc.2004.05.091
11. Dinara S. M., Jana S. K., Ghosh S., Mukhopadhyay P., Kumar R., Chakraborty A., Bhattacharya S., Biswas D. Enhancement of two dimensional electron gas concentrations due to Si₃N₄ passivation on Al_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN heterostructure: strain and interface capacitance analysis // *AIP Advances*. 2015. V. 5, Iss. 4. P. 047136. DOI: 10.1063/1.4919098
12. Sameer J. J. Surface and mechanical stress effects in Al–Ga_{0.3}N/GaN high electron mobility transistors: Thesis: Ph. D. Massachusetts Institute of Technology, Department of Materials Science and Engineering, 2017. 161 p. URL: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/111325>
13. Mosca R., Gombia E., Passaseo A., Tasco V., Peroni M., Romanini P. DLTS characterization of silicon nitride passivated Al–Ga_{0.3}N/GaN heterostructures // *Superlattices and Microstructures*. 2004. V. 36, Iss. 4–6. P. 425–433. DOI: 10.1016/j.spmi.2004.09.006
14. Hori Y., Mizue C., Hashizume T. Process conditions for improvement of electrical properties of Al₂O₃/n–Ga_{0.3}N structures prepared by atomic layer deposition // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2010. V. 49, N 8R. P. 080201. DOI: 10.1143/JJAP.49.080201
15. Hashizume T., Alekseev E., Pavlidis D., Boutros K. S., Redwing J. Capacitance–voltage characterization of AlN/GaN metal–insulator–semiconductor structures grown on sapphire substrate by metalorganic chemical vapor deposition // *J. Appl. Phys.* 2000. V. 88, Iss. 4. P. 1983–1986. DOI: 10.1063/1.1303722
16. Eller B. S., Yang J., Nemanich R. J. Electronic surface and dielectric interface states on GaN and AlGa_{0.3}N // *J. Vacuum Science & Technology A*. 2013. V. 31, Iss. 5. P. 050807. DOI: 10.1116/1.4807904
17. Dusza J., Steen M. Microhardness load/size effect in individual grains of a gas pressure sintered silicon nitride // *J. Amer. Ceramic Society*. 1998. V. 81, N 11. P. 3022–3024.
18. Яковлева Н. И., Никонов А. В., Болтарь К. О., Седнев М. В. Анализ механизмов темновых токов матриц ультрафиолетовых фотодиодов на основе гетероструктур AlGa_{0.3}N // *Успехи прикладной физики*. 2018. Т. 6, № 1. С. 44–55.
19. Monroe D. Hopping exponential band tails // *Phys. Rev. Lett.* 1985. V. 54, Iss. 2. P. 146–149. DOI: 10.1103/PhysRevLett.54.146
20. Бочкарева Н. И., Вороненков В. В., Горбунов Р. И., Вирко М. В., Коготков В. С., Леонидов А. А., Воронцов–Вельяминов П. Н., Шеремет И. А., Шретер Ю. Г. Прыжковая проводимость и диэлектрическая релаксация в барьерах Шоттки на основе GaN // *Физика и техника полупроводников*. 2017. Т. 51, № 9. С. 1235–1242. DOI: 10.21883/FTP.2017.09.44888.8528

Статья поступила в редакцию 5 января 2020 г.

Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering. 2019, vol. 22, no. 3, pp. 202–211. DOI: 10.17073/1609-3577-2019-3-202-211

ALD Al₂O₃, SiN_x, and SiON films as passivating coatings in AlGa_{0.3}N/GaN HEMT

K. L. Enisherlova^{1,§}, E. M. Temper¹, Yu. V. Kolkovsky¹, B. K. Medvedev¹, S. A. Kapilin¹

¹ JSC “S&PE “Pulsar”,
27 Okrzhnoy proezd, Moscow 105187, Russia

Abstract. The effect of passivating ALD Al₂O₃, SiN_x and SiON coatings of different thicknesses on the change in the charge and density of states of AlGa_{0.3}N/GaN heterostructures are studied. The electrophysical parameters of the structures were evaluated using C–V characteristics measured at different frequencies and I–V characteristics. Based on the considered zone diagrams of structures with different control voltages and the evaluation of the elemental composition of the films by Auger spectroscopy, it was shown that the cause of the formation of a large positive charge upon deposition of ALD Al₂O₃ and SiN_x films is the appearance of an additional piezoelectric charge in the AlGa_{0.3}N buffer layer. It is shown that the use of SiON films with an oxygen concentration of more than 3 % does not lead to the formation of an additional positive charge, but can cause current fluctuations when measuring I–V characteristics. A possible mechanism of carrier transport in the SCR region, leading to such fluctuations, is considered.

Information about authors:

Kira L. Enisherlova^{1,§}: Dr. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory (Enisherlova@pulsarnpp.ru); **Ella M. Temper**¹: Senior Researcher; **Yuri V. Kolkovsky**¹: Dr. Sci. (Eng.), Deputy General Director; **Boris K. Medvedev**¹: Senior Researcher; **Semen A. Kapilin**¹: Engineer

§ Corresponding author

Keywords: AlGa_n/Ga_n heterostructure, passivating coating, fixed charge, band diagram, spontaneous and piezoelectric polarization, donor-like centers, hopping conductivity, surface states

References

- Chevtchenko S. A., Reshchikov M. A., Fan Q., Ni X., Moon Y. T., Baski A. A., Morkoç H. Study of SiN_x and SiO₂ passivation of GaN surfaces. *J. Appl. Phys.*, 2007, vol. 101, no. 11, pp. 2740324. DOI: 10.1063/1.2740324
- Mizue C., Hori Y., Miczek M., Hashizume T. Capacitance–voltage characteristics of Al₂O₃/AlGa_n/Ga_n structures and state density distribution at Al₂O₃/AlGa_n interface. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2011, vol. 50, no. 2R, p. 021001. DOI: 10.1143/JJAP.50.021001
- Matys M., Stoklas R., Blaho M., Adamowicz B. Origin of positive fixed charge at insulator/AlGa_n interfaces and its control by AlGa_n composition. *J. Appl. Phys.*, 2017, vol. 110, no. 24, p. 243505. DOI: 10.1063/1.4986482
- Geng K., Hori Y., Zhou Q., Wang H. AlGa_n/Ga_n MIS–HEMT with PECVD SiN_x, SiON, SiO₂ as gate dielectric and passivation layer. *Electronics*, 2018, vol. 7, no. 12, p. 416. DOI: 10.3390/electronics7120416
- Matys M., Adamowicz B., Domanowska A., Michalewicz A., Stoklas R., Akazawa M., Yatabe Z., Hashizume T. On the origin of interface states at oxide/III–nitride heterojunction interfaces. *J. Appl. Phys.*, 2016, vol. 120, no. 22, p. 225305. DOI: 10.1063/1.4971409
- Shengyin Xie, Jiayun Yin, Sen Zhang, Bo Liu, Wei Zhou, Zhihong Feng. Trap behaviors in AlGa_n–Ga_n heterostructures by C–V characterization. *Solid–State Electronics*, 2009, vol. 53, no. 11, p. 1183–1185. DOI: 10.1016/j.sse.2009.08.006
- Zubkov V. I. Characterization of In_xGa_{1–x}As/GaAs quantum–well heterostructures by C–V measurements: band offsets, quantum–confinement levels, and wave functions. *Semiconductors*, 2007, vol. 41, no. 3, pp. 320–326. DOI: 10.1134/S1063782607030153
- Miczek M., Mizue C., Hashizume T., Adamowicz B. Effects of interface states and temperature on the C–V behavior of metal/insulator/AlGa_n/Ga_n heterostructure capacitors. *J. Appl. Phys.*, 2008, vol. 103, no. 10, p. 104510. DOI: 10.1063/1.2924334
- Arulkumaran S., Egawa T., Ishikawa H., Jimbo T. Characterization of different –Al–content Al_xGa_{1–x}N/Ga_n heterostructures and high–electron–mobility transistors on sapphire. *J. Vacuum Science & Technology B*, 2003, vol. 21, no. 2, p. 888–894. DOI: 10.1116/1.1556398
- Hashizume T., Hasegawa H. Effects of nitrogen deficiency on electronic properties of AlGa_n surfaces subjected to thermal and plasma processes. *Applied Surface Science*, 2004, vol. 234, no. 1–4, pp. 387–394. DOI: 10.1016/j.apsusc.2004.05.091
- Dinara S. M., Jana S. Kr., Ghosh S., Mukhopadhyay P., Kumar R., Chakraborty A., Bhattacharya S., Biswas D. Enhancement of two dimensional electron gas concentrations due to Si₃N₄ passivation on Al_{0.3}Ga_{0.7}N/Ga_n heterostructure: strain and interface capacitance analysis. *AIP Advances*, 2015, vol. 5, no. 4, p. 047136. DOI: 10.1063/1.4919098
- Sameer J. J. Surface and mechanical stress effects in Al–Ga_n/Ga_n high electron mobility transistors: Thesis: Ph. D. Massachusetts Institute of Technology, Department of Materials Science and Engineering, 2017, 161 p. URL: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/111325>
- Mosca R., Gombia E., Passaseo A., Tasco V., Peroni M., Romanini P. DLTS characterization of silicon nitride passivated AlGa_n/Ga_n heterostructures. *Superlattices and Microstructures*, 2004, vol. 36, no. 4–6, pp. 425–433. DOI: 10.1016/j.spmi.2004.09.006
- Hori Y., Mizue C., Hashizume T. Process conditions for improvement of electrical properties of Al₂O₃/n–Ga_n structures prepared by atomic layer deposition. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2010, vol. 49, no. 8R, p. 080201. DOI: 10.1143/JJAP.49.080201
- Hashizume T., Alekseev E., Pavlidis D., Boutros K. S., Redwing J. Capacitance–voltage characterization of AlN/Ga_n metal–insulator–semiconductor structures grown on sapphire substrate by metalorganic chemical vapor deposition. *J. Appl. Phys.*, 2000, vol. 88, no. 4, p. 1983–1986. DOI: 10.1063/1.1303722
- Eller B. S., Yang J., Nemanich R. J. Electronic surface and dielectric interface states on GaN and AlGa_n. *J. Vacuum Science & Technology A*, 2013, vol. 31, no. 5, p. 050807. DOI: 10.1116/1.4807904
- Dusza J., Steen M. Microhardness load/size effect in individual grains of a gas pressure sintered silicon nitride. *J. Amer. Ceramic Society*, 1998, vol. 81, no. 11, pp. 3022–3024.
- Iakovleva N. I., Nikonov A. V., Boltar K. O., Sednev M. V. Analysis of current–voltage characteristics in UV AlGa_n heterostructure FPAS. *Uspekhi Prikladnoi Fiziki*, 2018, vol. 6, no. 1, pp. 44–55. (In Russ.)
- Monroe D. Hopping exponential band tails. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, vol. 54, no. 2, pp. 146–149. DOI: 10.1103/PhysRevLett.54.146
- Bochkareva N. I., Voronkov V. V., Gorbunov R. I., Shreter Y. G., Virko M. V., Kogotkov V. S., Leonidov A. A., Vorontsov–Velyaminov P. N., Sheremet I. A. Hopping conductivity and dielectric relaxation in Schottky barriers on GaN. *Semiconductors*, 2017, vol. 51, no. 9, pp. 1186–1193. DOI: 10.1134/S1063782617090068

Received January 5, 2020

* * *