

УДК 621.38-022.532

**IN-SITU ПАССИВАЦИЯ НИТРИДНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР С
ТОНКИМИ БАРЬЕРНЫМИ СЛОЯМИ ДЛЯ ТРАНЗИСТОРОВ С
ВЫСОКОЙ ПОДВИЖНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОНОВ**

А. А. Андреев, М. Л. Занавескин, И. О. Майборода, В. В. Москвин, П. А. Перминов
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Статья получена 25 декабря 2013 г.

Аннотация. В работе методом молекулярно-лучевой эпитаксии получены Ga-полярные гетероструктуры для транзисторов с высокой подвижностью электронов на основе гетеропереходов AlGaN/AlN/GaN и AlN/GaN с общей толщиной барьерного слоя 11 нм и 3 нм соответственно. Благодаря использованию технологии *in-situ* пассивации поверхности диэлектриком Si₃N₄ достигнуты слоевые сопротивления проводящего канала менее 300 Ом/кв. Обнаружен эффект диффузии кремния из слоя пассивации в область проводящего канала, зависящий от температуры подложки в процессе осаждения пассивирующего слоя.

Ключевые слова: транзисторы с высокой подвижностью электронов, GaN, *in-situ* пассивация, диффузия кремния.

Abstract. In this study Ga-polar heterostructures for high electron mobility transistors based on AlGaN/AlN/GaN and AlN/GaN heterojunctions with total barrier thickness of 11 and 3 nm respectively are obtained using molecular beam epitaxy. Due to *in-situ* SiN_x surface passivation conducting channel sheet resistance less than 300 Ω/□ is achieved. Temperature dependent diffusion of Si atoms from passivation layer to conducting channel is detected.

Key words: HEMT, GaN, *in-situ* passivation, silicon diffusion.

Введение.

Уникальные свойства нитридов элементов третьей группы (Ga, Al, In) делают их наиболее подходящими кандидатами для создания мощных транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT – high electron mobility transistor), работающих на частотах более 90 ГГц. В роли проводящего канала в нитридных гетероструктурах выступает двумерный электронный газ, который образуется на гетерогранице GaN/AlGaN благодаря эффектам спонтанной и пьезоэлектрической поляризации в данных материалах. Для увеличения рабочей частоты транзистора необходимо уменьшение длины затвора. Одновременно длина затвора должна минимум в 10-15 раз превосходить расстояние между затвором и проводящим каналом [1], соответственно ее уменьшение должно сопровождаться приближением затвора к двумерному электронному газу. Одним из путей приближения затвора к каналу двумерного электронного газа является утонения барьерного слоя AlGaN и повышения мольной доли алюминия вплоть до чистого AlN. Однако с уменьшением толщины барьерного слоя снижается количество носителей в проводящем канале.

В работе [2] предложена модель, описывающая концентрацию электронов в двумерном газе в зависимости от толщины барьерного слоя. Концентрация носителей в проводящем канале гетероструктуры может быть вычислена с помощью выражения:

$$qn_s = \sigma_{PZ}(1 - d_{CR}/d), \quad d \geq d_{CR} \quad (1)$$

где q – величина заряда электрона, n_s – слоевая концентрация электронов, σ_{PZ} – слоевая плотность индуцированного поляризацией заряда на гетерогранице (определяется мольной долей алюминия в барьерном слое), d – толщина барьерного слоя AlGaN, d_{CR} – критическая толщина барьерного слоя, при

которой двухмерный электронный газ перестает существовать. Критическая толщина определяемая формулой:

$$d_{CR} = (E_D - \Delta E_C)\epsilon/q\sigma_{FZ} \quad (2)$$

где ΔE_C – величина разрыва зоны проводимости на гетерогранице, определяемая мольной долей алюминия в барьерном слое, ϵ – диэлектрическая проницаемость AlGaN, E_D – энергия активации поверхностных доноров относительно края зоны проводимости на границе завершающего слоя AlGaN и вакуума (см. рисунок 1). Вычисления, проводимые с использованием данных выражений, хорошо согласуются с экспериментальными данными для структур с толщиной барьерного слоя AlGaN $d < 30$ нм (более общая модель дается в работе [3]).

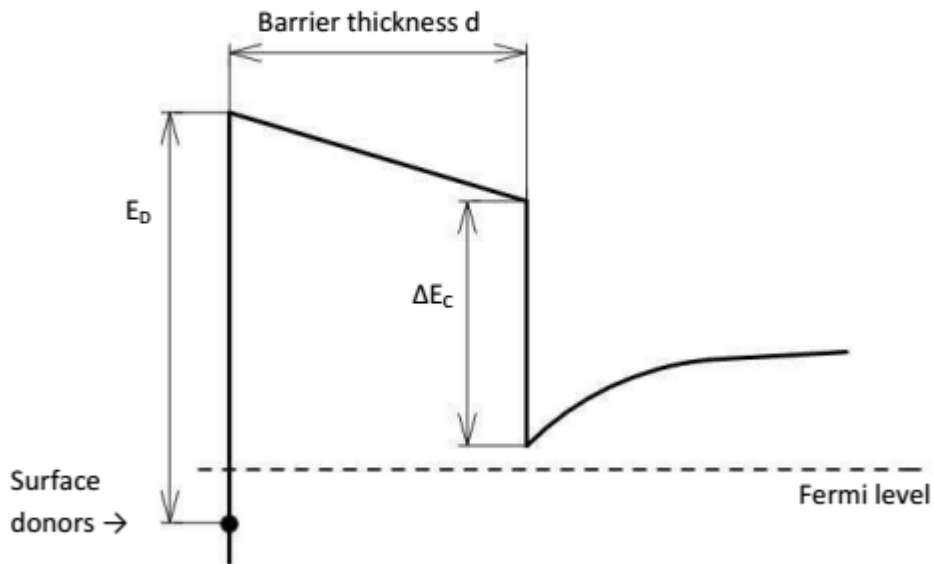


Рисунок 1. Зонная диаграмма гетероперерода AlGaN/GaN.

При уменьшении толщины барьерного слоя d концентрация носителей в проводящем канале снижается. Как только d становится меньше $d_{св}$, двумерный газ исчезает. Добиться высокого значения n_s при снижении толщины барьерного слоя d можно повышением мольной доли алюминия. Долю Al можно поднимать при уменьшении d вплоть до 100%, в то время как в толстом барьерном слое AlGaN высокое содержание алюминия приведет к образованию дополнительных дефектов или даже разрушению слоя из-за значительного рассогласования параметров решеток GaN и AlGaN и вызванных им латеральных напряжений.

Для повышения концентрации носителей в проводящем канале гетероструктуры может быть использованы различные виды пассивации поверхности гетероструктуры. В частности одним из перспективных направлений является *in-situ* пассивация Si_3N_4 непосредственно в ростовой камере молекулярно-лучевой эпитаксии, главным преимуществом которой является исключение взаимодействия поверхности AlGaN с атмосферой [4,5].

Нанесение нитрида кремния приводит к образованию на поверхности барьерного слоя AlGaN положительно заряженных донорных состояний [6] с низкой энергией активации, что приводит к изменению E_D в уравнении (2). Таким образом можно добиться максимально возможной концентрации электронов в двумерном газе, определяемой эффектами спонтанной и пьезоэлектрической поляризации на гетерогранице AlGaN/GaN.

Важной особенностью создания пассивационных слоев в камере аммиачной МЛЭ является сравнительно высокая температура подложки (более $650^{\circ}C$), необходимая для разложения аммиака. При этом вероятным процессом становится диффузия кремния через барьерный слой к области локализации двумерного газа в результате которой может снижаться подвижность электронов в канале.

В настоящей работе приводятся экспериментальные результаты создания нитридных гетероструктур для НЕМТ-транзисторов с толщиной барьерного

слоя менее 10 нм методом аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии. Изучено влияние условий проведения *in-situ* пассивации Si_3N_4 на концентрацию носителей в канале двумерного газа и диффузию кремния в область канала.

Методика эксперимента.

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках сапфира (0001) были выращены Ga-полярные гетероструктуры для НЕМТ с гетеропереходами GaN/AlN/AlGaN и GaN/AlN. В первом случае барьерный слой состоял из AlN толщиной 1 нм и $\text{Al}_x\text{Ga}_{x-1}\text{N}$ толщиной 25 и 10 нм с мольной долей алюминия $x=0,3$ и $x=0,4$ соответственно. Во втором случае барьерный слой представлял собой эпитаксиальную пленку AlN толщиной 3 нм. Температура подложки при росте GaN и завершающих слоев AlGaN, AlN составляла 930°C . Осаждение пассивирующего слоя SiN_x толщиной 30 нм проводилось после роста структуры непосредственно в ростовой камере. Для создания молекулярного потока кремния на подложку была использована эффузионная ячейка Кнудсена. Измерение электрофизических характеристик двумерного электронного газа (холловская подвижность и слоевая концентрация носителей заряда) в структурах проводилось методом ван дер Пау.

Структуры с барьерным слоем AlGaN толщиной 10 нм.

Для сопоставления электрофизических параметров двумерного электронного газа была выращена контрольная гетероструктура с толстым барьерным слоем AlGaN 25 нм, в котором мольная доля алюминия составляла 30%. Подвижность носителей в двумерном проводящем канале составила $1400 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, их слоевая концентрация $1,38 \cdot 10^{13}$, слоевое сопротивление проводящего канала 320 Ом. В дальнейшем тонкие барьерные слои были получены в аналогичных ростовых процессах и отличались мольной долей алюминия и толщиной барьерного слоя.

Далее были выращены структуры с барьерным слоем AlGaN толщиной 10 нм с мольной долей алюминия 40%. На одной из структур пассивация отсутствовала, на двух других она была осаждена при температурах 930°C и 800°C. Данные по электрофизическим характеристикам проводящего канала представлены в таблице 1.

Таблица 1. Электрофизические параметры двумерного электронного газа структур с AlGaN в барьерном слое толщиной 10 нм.

Температура подложки при осаждении SiN _x	Без пассивации	930°C	800°C
Подвижность, см ² /(В*с)	1616	442	1254
Концентрация, 10 ¹³ см ⁻²	1,2	4,6	1,7
Слоевое сопротивление, Ом/кв.	350	307	293

Повышение доли алюминия до 40% позволило получить параметры двумерного газа близкие к характеристикам контрольного образца при уменьшении толщины AlGaN в 2,5 раза. *In-situ* пассивация поверхности позволила повысить концентрацию носителей в проводящем канале структур, однако было обнаружено, что подвижность и концентрация электронов в канале зависят от температуры подложки при осаждении SiN_x. Пассивация при 930°C привела к увеличению слоевой концентрации электронов почти в четыре раза при снижении и снижению их подвижности с 1616 до 442 см²/(В*см). При снижении температуры пассивации до 800°C подвижность возросла до 1254 см²/(В*см), а концентрация носителей опустилась до 1,7*10¹³ см⁻².

Структуры с барьерными слоями AlN толщиной 3 нм.

Были выращены 3 структуры с барьерным слоем AlN толщиной 3 нм: одна без пассивирующего слоя, и две пассивированных, на которых осаждение

нитрида кремния проводилось при температурах 800°C и 700°C. Данные по электрофизическим характеристикам проводящего канала представлены в таблице 2.

Таблица 2. Электрофизические параметры двумерного электронного газа структур с барьерным слоем AlN толщиной 3 нм.

Температура подложки при осаждении SiN _x	Без пассивации	800°C	700°C
Подвижность, см ² /(В*с)	390	473	1220
Концентрация, 10 ¹³ см ⁻²	0,7	2,1	1,8
Слоевое сопротивление, Ом/кв.	2166	629	283

На образце без пассивации концентрация носителей и их подвижность в проводящем канале имели низкие значения. Это объясняется тем, что толщина 3 нм близка к критической толщине AlN, составляющей 1-2 нм. Пассивация поверхности при температуре подложки 800°C повысила концентрацию носителей, при этом подвижность носителей составила всего 473 см²/(В*см). Снижение температуры пассивации позволило получить высокую концентрацию и подвижность носителей, благодаря чему слоевое сопротивление канала составило 283 Ом/кв.

Влияние in-situ пассивации на электрофизические характеристики двумерного электронного газа.

Мы предполагаем, что при осаждении пассивирующего слоя на исследованных образцах происходили два различных процесса, приводящих к увеличению концентрации носителей в проводящем канале. Первый процесс связан с возникновением заряженных донорных состояний на поверхности

AlGaN [6]. Второй процесс скорее всего связан с диффузией кремния из слоя пассивации в область проводящего канала через барьерный слой. Эти два процесса отличает влияние на подвижность носителей в проводящем канале, а так же зависимость от температуры подложки во время формирования пассивационного слоя.

Влияние на подвижность носителей можно оценить исходя из данных, полученных на структурах с барьерным слоем 10 нм, так как на образце без пассивации уже присутствует электронный газ с концентрацией электронов более 10^{13} см^{-2} . Максимальная концентрация подвижных электронов на гетерогранице определяется плотностью связанных зарядов, возникающих благодаря эффектам поляризации, которая для мольной доли Al 40% не превосходит $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ [7]. Проведение пассивации при 930°C привело к увеличению концентрации носителей до $4,6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, что свидетельствует о появлении в области проводящего канала дополнительных источников свободных электронов. Отметим еще раз, что на всех структурах рост GaN и барьерных слоев проводился при одинаковой температуре подложки, и значит плотность дефектов, которые могли бы стать источниками свободных зарядов, на всех структурах одинакова, поэтому единственным источником избыточных свободных зарядов являлись атомы кремния, диффундировавшие из пассивирующего слоя. В то же время, наличие ионизированных атомов в области проводящего канала приводит к рассеянию электронов и снижает их подвижность. При снижении температуры пассивации подвижность носителей заряда в канале возросла, а их концентрация опустилась ниже $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, что демонстрирует температурную зависимость эффекта и еще раз указывает на процесс диффузии.

Образцы с барьерными слоями AlN толщиной 3 нм хорошо иллюстрируют различие влияний процесса диффузии кремния, зависящего от температуры, и возникновения заряженных донорных состояний на поверхности барьерного слоя. Образец, пассивированный при 800°C имеет высокую концентрацию

более $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и низкую подвижность носителей, а снижение температуры пассивации до 700°C позволяет поднять подвижность до $1220 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{см})$. Повышение подвижности можно объяснить устранением диффузии атомов кремния, а значит повышение концентрации носителей до $1,8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ обусловлено образованием заряженных донорных состояний на поверхности барьерного AlN.

Предположение о диффузии атомов кремния подкрепляется еще и тем фактом, что для достижения высокой подвижности носителей в канале для барьерного слоя AlN 3 нм понадобилось снизить температуру подложки при осаждении нитрида кремния ниже 800°C , хотя для барьерного слоя AlGaIn толщиной 10 нм этой температуры оказалось достаточно для восстановления подвижности $1254 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{см})$. Эту особенность можно объяснить тем, что диффузия через слой толщиной 3 нм происходит быстрее, чем через слой толщиной 10 нм, что и приводит к большей концентрации диффундировавших атомов кремния в проводящем канале при равных температурах подложек и временах роста пассивационного слоя.

Заключение

Применение *in-situ* пассивации Si_3N_4 в камере МЛЭ позволило получить НЕМТ нитридные гетероструктуры с толщинами барьерных слоев 10 нм и 3 нм со слоевым сопротивлением менее 300 Ом/кв. Установлено критическое влияние высокой температуры подложки во время осаждения слоя пассивации, приводящей к диффузии атомов кремния в область пространственной локализации двухмерного газа.

Литература

1. Jessen G.H., Fitch Robert C., Gillespie J.K., Via G., Crespo A., Langley D., Denninghoff, D.J., Trejo M., Heller E.R. Short-Channel Effect Limitations on

- High-Frequency Operation of AlGa_N/Ga_N HEMTs for T-Gate Devices // IEEE Transaction on Electron Devices, 2589 – 2597, 2007.
2. Ibbetson J. P., Fini P. T., Ness K. D., DenBaars S. P., Speck J. S., Mishra U. K. Polarization effects, surface states, and the source of electrons in AlGa_N/Ga_N heterostructure field effect transistors // Applied Physics Letters 77, 250, 2000.
 3. Nitin Goyal and Tor A. Fjeldly. Effects of strain relaxation on bare surface barrier height and two-dimensional electron gas in Al_xGa_{1-x}N/Ga_N heterostructures // Journal of Applied Physics 113, 014505, 2013.
 4. Green B.M., Chu K.K., Chumbes E.M., Joseph A. Smart J.A., Shealy J.R., Eastman L.F. The Effect of Surface Passivation on the Microwave Characteristics of Undoped AlGa_N/Ga_N HEMT's // IEEE Electron Device Letters, VOL. 21, NO. 6, 268-270, 2000.
 5. Vetury R., Zhang N.Q., Keller S., Mishra U.K. The Impact of Surface States on the DC and RF Characteristics of AlGa_N/Ga_N HFETs, IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 48, NO. 3, 560-566, 2001.
 6. Onojimaa N., Higashiwaki M., Suda J., Kimoto T., Mimura T., Matsui T. Reduction in potential barrier height of AlGa_N/Ga_N heterostructures by SiN passivation // J. Appl. Phys. 101, 043703, 2007.
 7. Ambacher O., Majewski J., Miskys C., Link A., Hermann M., Eickhoff M., Stutzmann M., Bernardini F., Fiorentini V., Tilak V., Schaff B., Eastman L. F. Pyroelectric properties of Al(In)Ga_N/Ga_N hetero- and quantum well structures // J. Phys.: Condens. Matter 14, 3399–3434, 2002.