

07.2

Влияние поверхностных ловушек на статические характеристики и разброс тока насыщения канала GaN HEMT-транзисторов

© В.Г. Тихомиров¹, С.В. Чижиков², А.Г. Гудков², В.М. Устинов³¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, Санкт-Петербург, Россия² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия³ НТЦ микроэлектроники РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: greenbob54@gmail.com

Поступило в Редакцию 12 сентября 2023 г.

В окончательной редакции 17 октября 2023 г.

Принято к публикации 17 октября 2023 г.

Рассмотрен метод нейтрализации поверхностных ловушек в структурах нитрид-галлиевых транзисторов с высокой подвижностью электронов (GaN HEMT), основанный на использовании поэтапного температурного воздействия — термотренировки. Проведены расчеты и экспериментальные исследования влияния ловушек на статические характеристики GaN HEMT, а также предложены эффективные способы борьбы с ловушками, в частности с помощью предлагаемых оптимальных режимов термотренировки.

Ключевые слова: поверхностные ловушки, HEMT, GaN.

DOI: 10.61011/PJTF.2023.22.56600.19727

В настоящее время в области сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники гетероструктуры $A^{III}B^V$ на основе арсенида галлия активно вытесняются гетероэпитаксиальными структурами нитридов III группы, в первую очередь при использовании в качестве материала для энергоэффективных транзисторов, которые, в частности, могут применяться в усилительном тракте СВЧ-аппаратуры. Высокая концентрация электронов в канале и высокое пробивное напряжение позволяют достичь в сверхвысокочастотных полевых транзисторах на основе GaN в 5–10 раз большей плотности мощности, чем в аналогичных GaAs-приборах. Одновременно с этим существует несколько проблем, возникающих при работе нитрид-галлиевых транзисторов с высокой подвижностью электронов (GaN HEMT) в СВЧ-режимах. Одной из таких проблем является присутствие в структурах транзистора дефектов различного типа, которые значительно снижают и быстродействие, и выходную мощность прибора [1]. Особое влияние на работу HEMT на основе нитридов оказывают поверхностные ловушки, возникающие на границе раздела слоев тонкого пассивирующего диэлектрика, например Si_3N_4 , и барьерного слоя AlGaN. По этой причине ведутся активные работы по поиску методов, которые уменьшают влияние данных ловушек на параметры устройств. В работе рассматривается метод нейтрализации поверхностных ловушек, основанный на использовании поэтапного температурного воздействия — термотренировки. Проведены расчеты и экспериментальные исследования влияния ловушек на статические характеристики транзисторов, а также предложены эффективные способы борьбы с ловушками.

Для проведения экспериментов методом MOCVD (газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений) было выращено несколько гетероструктур GaN/AlGaN на подложках SiC, на основе которых

изготовлены HEMT с T -образным затвором шириной $200 \mu m$ и длиной $0.5 \mu m$, что определяется частотным диапазоном их работы. Основными функциональными слоями транзисторной гетероструктуры являются буферный слой GaN толщиной $2 \mu m$ и барьерный слой $Al_{0.23}Ga_{0.77}N$ толщиной 20–22 nm. В качестве диэлектрика, расположенного под краями „шляпки“ T -образного затвора, используется нитрид кремния, полученный методом осаждения в плазме в условиях электронного циклотронного резонанса. Формирование металлизации омических контактов и разводки контактных площадок проводилось с применением метода взрывной фотолитографии. В качестве металлизации омических контактов использовалась система Ti/Al/Ni/Au с последующим быстрым термическим отжигом в среде азота. Межприборная изоляция осуществлялась методом ионной имплантации. Формирование затворной металлизации Ni/Au проводилось с помощью электронной литографии и термического напыления. Результаты предварительных исследований разработанных транзисторов подробно изложены в [2]. Пластина с изготовленными транзисторами была разделена на отдельные кристаллы, из которых для проведения дальнейших экспериментов были отобраны контрольные образцы по следующим критериям: ток насыщения от 160 до 190 mA, напряжение отсечки не менее 5 V, ток утечки при напряжении затвор–сток 60 V не более $300 \mu A$, что определяется условиями годности транзистора согласно техническому заданию.

Созданные HEMT проходили всестороннее тестирование, включающее исследование всех основных характеристик и определение рабочих параметров. В частности, определялись их мощностные параметры, времена задержки, токи насыщения и др. Особое внимание было уделено обнаружению и исследованию свойств ловушек в готовых транзисторных структурах с пассивирующим

диэлектриком, а также определению их влияния на рабочие характеристики приборов. Методика исследования основывалась на активации ловушек путем воздействия на них оптического излучения с энергией фотонов от 1.0 до 4.5 eV. Были определены характерные энергии фотонов, при которых наблюдалась активация ловушек, а также рассчитаны относительный прирост выходной мощности и времена релаксации поверхностных ловушек. Для снижения влияния поверхностных ловушек была предложена методика их нейтрализации, включающая в себя однократное или многоэтапное воздействие на структуры повышенных температур (от 200 до 350°C). Общая продолжительность воздействий варьировалась в пределах от нескольких минут до 8 h.

Для анализа влияния ловушек на выходные характеристики транзистора было проведено математическое моделирование его характеристик на основе ранее разработанных и успешно опробованных численных моделей НЕМТ [2–4], в которых были реализованы калибровки и численные алгоритмы расчета гетероструктур, включая модели ловушек [5,6]. После адаптации математических моделей с учетом особенностей изготовленного транзистора, которые предполагают наличие ловушек в разных областях его структуры, был проведен численный эксперимент, демонстрирующий возможное влияние наличия и расположения ловушек в структуре транзистора на вольт-амперные характеристики (ВАХ) GaN НЕМТ. Для этого в рамках разработанной модели была задана структура транзистора при допущении отсутствия ловушек и рассчитаны ВАХ. Затем в предполагаемые места расположения ловушек были добавлены виртуальные ловушки с наиболее вероятными характеристиками, полученными из литературных источников и подтвержденными данными собственных экспериментов. Результаты моделирования подтверждались экспериментальными результатами измерения выходных параметров транзисторов.

Следует отметить, что в нитридной гетероструктуре, на которой основан исследуемый транзистор, возникновение подвижных зарядов на границе GaN/AlGaN напрямую связано с эффектами спонтанной поляризации и пьезополяризации, которые существуют в кристаллической решетке типа вюрцита, что принципиально отличает ее от гетероструктур на основе арсенида галлия. В результате возникает сложное равновесное распределение системы зарядов от поверхности гетероструктуры до подложки, включая заряды ловушек в буфере, барьерном слое и на границе раздела полупроводник–диэлектрик, которое приводит к возникновению на гетерогранице квантовой ямы, заполненной двумерным электронным газом высокой подвижности и концентрации. Схематически картина распределения системы зарядов по глубине гетероструктуры представлена на рис. 1. На нем показаны следующие величины: $+\sigma_s$ — неподвижный положительный заряд на поверхности гетероструктуры; $-\sigma_{\text{AlGaN}}$ — неподвижный отрицательный заряд барьерного слоя, связанный с эффектами спонтанной поляри-

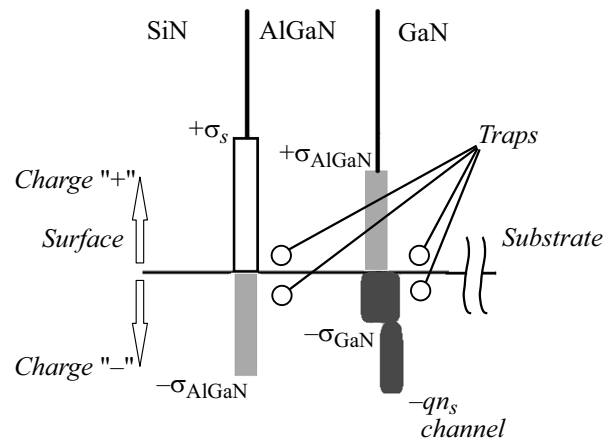


Рис. 1. Схема распределения системы зарядов и возможного расположения ловушек по глубине гетероструктуры нитридного транзистора.

зации и пьезополяризации; $-\sigma_{\text{GaN}}$ — неподвижный отрицательный заряд на границе буферного и барьерного слоев, связанный с эффектами спонтанной поляризации и пьезополяризации; $+\sigma_{\text{AlGaN}}$ — неподвижный положительный заряд барьерного слоя, связанный с эффектами спонтанной поляризации и пьезополяризации; $-qn_s$ — подвижный отрицательный заряд вблизи границы буферного и барьерного слоев, связанный с носителями заряда в канале транзистора.

С учетом отмеченного выше становится понятным, что в гетероструктурном транзисторе GaN/AlGaN ловушки могут оказывать очень серьезное влияние на выходные характеристики прибора. Кроме того, такие электронные состояния, которые распространяются на поверхность барьерного слоя, могут еще более усугублять проблемы, связанные с большим количеством открытых нитридных связей на поверхности гетероструктуры после извлечения ее из ростовой камеры. При этом при работе транзистора с ростом напряженности электрического поля из-за эффекта Френкеля–Пула [7] уменьшается высота барьера, через который может туннелировать захваченный электрон. Таким образом, электроны, захваченные вблизи уровня Ферми, могут легко переходить в ловушки на поверхности, что приводит к увеличению их влияния на статические и динамические характеристики транзистора. Для подавления этих эффектов традиционно проводится пассивация поверхности нитридной гетероструктуры пленкой SiN. После пассивации, как правило, плотность поверхностных состояний значительно снижается. Но следует отметить, что, хотя пассивация SiN значительно снижает плотность ловушек на поверхности, она не может полностью удалить все ловушки. Решающую роль играют исходное состояние поверхности перед пассивацией, качество пленки SiN, условия и режимы нанесения пленки и прочие технологические и конструктивные особенности изготовления транзистора.

Обычно предполагается, что хорошие результаты могут быть достигнуты, если после очистки поверхности пластины ацетоном и этанолом перед помещением пластины в камеру для осаждения пленки SiN проводить обработку соляной кислотой, разбавленной водой в соотношении 1:5. Перед нанесением пленки температуру камеры повышают до 300°C, что на 50°C выше температуры осаждения пленки SiN, и выдерживают пластину в атмосфере азота в течение 40 min.

Однако, как показали наши исследования, без проведения термотренировки влияние поверхностных состояний на статические характеристики транзистора все равно оказывается весьма значительным.

Были выполнены расчеты для нескольких характерных вариантов параметров ловушек и мест их расположения, для каждого варианта получены транзисторные ВАХ. Далее полученные расчетные ВАХ сравнивались с экспериментальными, измеренными до и после отжига в воздушной атмосфере при температуре 300°C в течение 3 h. В случае совпадения этих ВАХ в пределах заданной погрешности (обычно несколько процентов) можно предположить, что мы имеем дело с ловушками, расположенными в заданных в численном эксперименте местах и имеющими при этом предполагаемые характеристики. Результаты численного моделирования и их сопоставление с экспериментальными данными показаны на рис. 2.

Из анализа приведенных на рис. 2 результатов численного моделирования следует, что расчетные ВАХ, полученные без учета влияния ловушек, хорошо совпадают с экспериментальными для транзисторов, подвергнутых отжигу при температуре 300°C в течение 3 h. До отжига хорошее совпадение с экспериментом обеспечивает модель, учитывающая ловушки с определенными параметрами. При этом наилучшее совпадение расчетов с экспериментом дает расположение ловушек в области границы диэлектрик–полупроводник. Следует отметить, что отжиг при температурах, меньших 300°C (200–250°C), не приводил к заметным изменениям ВАХ транзисторов, а отжиг более 3 h (5–8 h) также не увеличивал заметно ток канала по сравнению с режимом 3 h при 300°C. Режимы отжига при температурах, существенно превышающих 300°C, приводят к деградации затвора и не могут быть применены в нашем случае. Параметры ловушек при этом вводились следующие: энергия активации 1.7 eV, поверхностная концентрация $5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, сечение захвата $5 \cdot 10^{-19} \text{ cm}^2$. Если требуется оценить влияние термостабилизации на динамические характеристики прибора, то лучшие результаты в численном эксперименте может дать дополнительный учет ловушек, расположенных в буферном слое, с энергией активации 1.8 и 2.5 eV, концентрацией $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ и сечением захвата $4 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$ и ловушек в барьерном слое с энергией активации 2.9 eV, концентрацией $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ и сечением захвата $4 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$, что хорошо соотносится с данными, полученными в [5], и результатами исследований в [6–10].

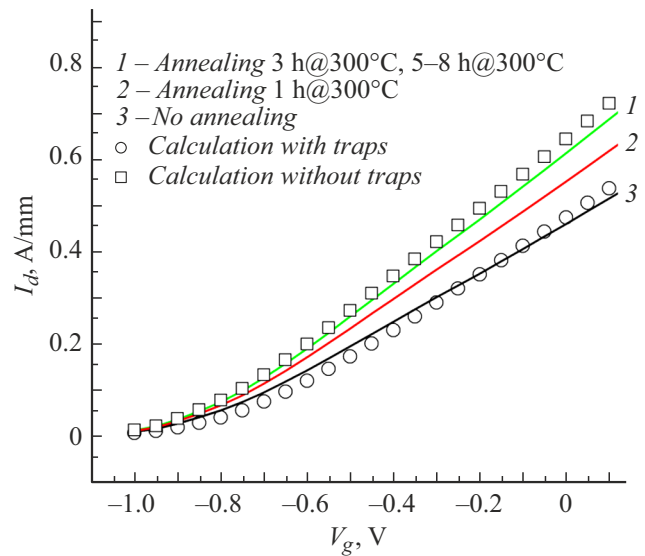


Рис. 2. Экспериментальные и расчетные передаточные вольт-амперные характеристики транзистора при разных режимах термотренировки. Кружками показана расчетная кривая с учетом влияния ловушек, квадратами — расчетная кривая без учета влияния ловушек. 1 — экспериментальная кривая при термотренировке в режиме 300°C в течение 3 h и более, 2 — экспериментальная кривая при термотренировке в режиме 300°C в течение 1 h, 3 — экспериментальная кривая до проведения термотренировки.

Полученные в рамках численного моделирования оценки позволяют предположить, что граница барьерного слоя и пассивирующего диэлектрика является местом наиболее вероятного расположения ловушек в транзисторной структуре. При этом ловушки данного типа существенным образом модифицируются под воздействием температуры 300°C в течение 3 h, что положительно влияет на статическую ВАХ прибора.

Представленные результаты численного моделирования не ориентированы непосредственно на расчет выходных СВЧ-характеристик и оценку изменения выходной мощности транзистора. Для этих задач необходимо реализовать математические модели, учитывающие динамическое поведение ловушек [11–13]. Однако они дают возможность разработчику обратить внимание на топологические и технологические особенности прибора, важные для достижения хороших статических выходных характеристик. В результате использования предложенной процедуры отжига было достигнуто существенное улучшение характеристик изготовленных транзисторов. В частности, разброс максимального тока канала снизился в несколько раз (с 8.5 до 2.6 mA) и была достигнута стабилизация других приборных характеристик (например, средний ток канала возрос со 166 до 193 mA). Проведенные исследования позволили определить оптимальные режимы термотренировки, необходимые для достижения наилучших параметров исследованных НЕМТ. В качестве иллюстрации на рис. 3

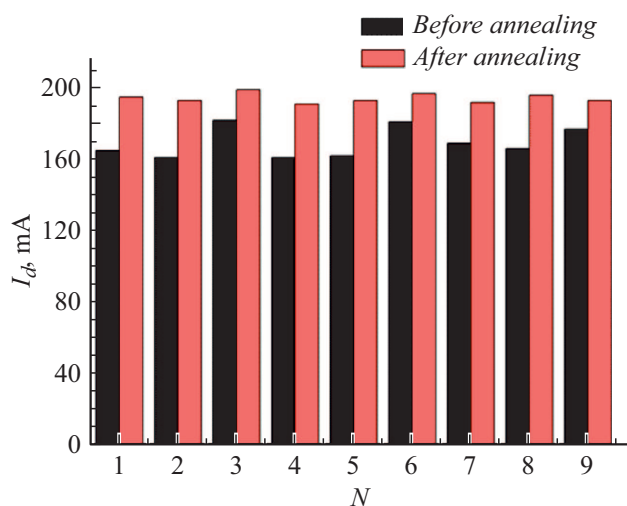


Рис. 3. Зависимость максимального тока канала исследованных образцов НЕМТ GaN/AlGaN до и после термотренировки. Стандартное отклонение до термотренировки составляет 8.5 мА, а после термотренировки — 2.6 мА. Среднее значение 166 и 193 мА соответственно.

приведены зависимости максимального тока канала до и после термотренировки, измеренные для девяти НЕМТ, подвергнутых отжигу в течение 3 h при 300°C. Наблюдается устойчивая стабилизация важнейших параметров (в частности, разброс по значениям тока канала значительно уменьшается, а сама величина тока насыщения заметно возрастает).

В ходе работы были созданы и исследованы НЕМТ на основе гетероструктур GaN/AlGaN с *T*-образным затвором шириной 200 μm и длиной 0.5 μm, содержащие слой тонкого пассивирующего диэлектрика Si₃N₄. Исследованы основные характеристики транзисторов и определены их рабочие параметры, включая мощность, токи насыщения и др. Влияние поверхностных ловушек на характеристики транзисторов теоретически исследовано методом численного моделирования и сопоставлено с экспериментальными данными. Показана существенная роль ловушек, расположенных на границе барьерного слоя AlGaN и пассивирующего слоя Si₃N₄. Разработана методика нейтрализации ловушек на основе использования термотренировки в течение 3 h при температуре 300°C. В результате достигнуто существенное улучшение параметров транзисторных структур, в частности достигнута существенная стабилизация токов канала с уменьшением разброса значений тока в 3 раза (с 8.5 до 2.6 мА).

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках соглашения № 19-19-00349-П от 19.05.2022 г.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] I. Daumiller, D. Theron, C. Gaquiere, A. Vescan, R. Dietrich, A. Wieszt, H. Leier, R. Vetry, U.K. Mishra, I.P. Smorchkova, S. Keller, N.X. Nguyen, C. Nguyen, E. Kohn, *IEEE Electron Dev. Lett.*, **22** (2), 62 (2001). DOI: 10.1109/55.902832
- [2] V.G. Tikhomirov, A. Gudkov, V. Petrov, S. Agasieva, A. Zybin, V. Yankevich, A. Evseenkov, in *Proc. of the 2017 11th Int. Workshop on the electromagnetic compatibility of integrated circuits (EMCCompo)* (IEEE, 2017), p. 115. DOI: 10.1109/EMCCompo.2017.7998094
- [3] К.С. Журавлев, Т.В. Малин, В.Г. Мансуров, О.Е. Терешенко, К.К. Абгарян, Д.Л. Ревизников, В.Е. Земляков, В.И. Егоркин, Я.М. Парнес, В.Г. Тихомиров, И.П. Просвирин, *ФТП*, **51** (3), 395 (2017). DOI: 10.21883/FTP.2017.03.44215.8287 [K.S. Zhuravlev, T.V. Malin, V.G. Mansurov, O.E. Tereshenko, K.K. Abgaryan, D.L. Reviznikov, V.E. Zemlyakov, V.I. Egorokin, Ya.M. Parnes, V.G. Tikhomirov, I.P. Prosvirin, *Semiconductors*, **51** (3), 379 (2017). DOI: 10.1134/S1063782617030277].
- [4] В.Г. Тихомиров, В.Е. Земляков, В.В. Волков, Я.М. Парнес, В.Н. Вьюгинов, В.В. Лундин, А.В. Сахаров, Е.Е. Заварин, А.Ф. Цацунчиков, Н.А. Черкашин, М.Н. Мизеров, В.М. Устинов, *ФТП*, **50** (2), 245 (2016). [V.G. Tikhomirov, V.E. Zemlyakov, V.V. Volkov, Ya.M. Parnes, V.N. Vyuginov, W.V. Lundin, A.V. Sakharov, E.E. Zavarin, A.F. Tsatsulnikov, N.A. Cherkashin, M.N. Mizerov, V.M. Ustinov, *Semiconductors*, **50** (2), 244 (2016). DOI: 10.1134/S1063782616020263].
- [5] M. Faqir, G. Verzellesi, F. Fantini, F. Danesin, F. Rampazzo, G. Meneghesso, E. Zanoni, A. Cavallini, A. Castaldini, N. Labat, A. Touboul, C. Dua, *Microelectron. Reliab.*, **47** (9), 1639 (2007). DOI: 10.1016/j.microrel.2007.07.005
- [6] R. Yeluri, B.L. Swenson, U.K. Mishra, *J. Appl. Phys.*, **111** (4), 043718 (2012). DOI: 10.1063/1.3687355
- [7] S.M. Sze, K.K. Ng, *Physics of semiconductor devices*, 3rd ed. (Wiley, 2007), p. 763.
- [8] W. Lu, V. Kumar, R. Schwindt, E. Piner, I. Adesida, *Solid-State Electron.*, **46** (9), 1441 (2002). DOI: 10.1016/S0038-1101(02)00089-8
- [9] R. Vetry, N.Q. Zhang, S. Keller, U.K. Mishra, *IEEE Trans. Electron Dev.*, **48** (3), 560 (2001). DOI: 10.1109/16.906451
- [10] A.V. Vertiatchikh, L.F. Eastman, W.J. Schaff, T. Prunty, *Electron. Lett.*, **38** (8), 388 (2002). DOI: 10.1063/1.5027634
- [11] S. Sarkar, R.P. Khade, N. DasGupta, A. DasGupta, in *2021 IEEE BiCMOS and Compound Semiconductor Integrated Circuits and Technology Symp. (BCICTS)* (IEEE, 2021), p. 1–4. DOI: 10.1109/BCICTS50416.2021.9682496
- [12] X. Lu, S. Feng, S. Pan, X. Li, K. Bai, H. Zhu, *IEEE Trans. Dev. Mater. Reliab.*, **23** (2), 257 (2023). DOI: 10.1109/TDMR.2023.3253957
- [13] Q. Meng, Q. Lin, W. Jing, N. Zhao, P. Yang, D. Lu, *Micromachines*, **13** (5), 791 (2022). DOI: 10.3390/mi13050791