

07:08

Взаимосвязь надежности AlGaIn/GaN транзисторов с характером организации наноматериала

© В.В. Емцев¹, Е.Е. Заварин¹, Г.А. Оганесян¹,
В.Н. Петров¹, А.В. Сахаров¹, Н.М. Шмидт¹,
В.Н. Вьюгинов², А.А. Зыбин², Я.М. Парнес²,
С.И. Видякин³, А.Г. Гудков³, А.Е. Черняков⁴

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

² ЗАО „Светлана-Электронприбор“, Санкт-Петербург

³ Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана

⁴ НТЦ микроэлектроники РАН, Санкт-Петербург

E-mail: Natalia.Schmidt@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 26 февраля 2016 г.

Приведены первые экспериментальные результаты, демонстрирующие корреляцию подвижности электронов в двумерном канале AlGaIn/GaN транзисторных (AlGaIn/GaN-HEMT) структур с характером организации наноматериала, а также с надежностью параметров транзисторов при эксплуатации. Показано, что улучшение характера организации наноматериала структур AlGaIn/GaN-HEMT-структур, количественно охарактеризованное мультифрактальным параметром степени разупорядоченности (нарушение локальной симметрии) наноматериала, сопровождается существенным, в несколько раз, увеличением подвижности электронов в двумерном канале и надежности параметров транзисторов, полученных из этих структур.

Транзисторы с высокой подвижностью электронов в двумерном канале (HEMT) на основе квантово-размерных AlGaIn/GaN-структур существенно расширяют возможности приборов СВЧ-диапазона. Высокая концентрация электронов в области двумерного канала в сочетании с приемлемой подвижностью электронов позволяет реализовать большую плотность тока в сечении канала транзистора и высокий коэффициент усиления. Максимальная критическая напряженность электрического поля в сочетании с высокой плотностью тока обеспечивает удельную выходную мощность GaN-транзисторов, на порядок превышающую

такую GaAs-транзисторов. Индустрия AlGaN/GaN-HEMT успешно развивается, и с каждым годом растут выходные мощности и рабочие частоты. Однако проблема низкой надежности параметров этих приборов, вызванная двумя явлениями — увеличением тока утечки затвора и падением выходной мощности и частоты при эксплуатации, не решена до сих пор, несмотря на многолетние усилия мирового научного сообщества [1,2]. Важная роль качества диэлектрика, пассивирующего поверхность HEMT, и барьера Шоттки, используемого в качестве затвора, не вызывает сомнения [1–3]. Однако не менее важными причинами, отмеченными в ряде работ, являются: 1) формирование вертикальных каналов протекания под действием обратных напряжений в активной области транзисторов [2]; 2) локальный саморазогрев горячими электронами [2]; 3) механические напряжения в твердом растворе [4]; 4) пьезоэлектрические эффекты [2]. При этом природа перколяционных каналов, локальных областей саморазогрева, возникающих под действием напряжения при тестировании AlGaN/GaN-HEMT на надежность, является предметом дискуссий [1–4], а общепринятые модели наблюдаемых явлений отсутствуют до сих пор. Представляется, что наблюдаемые явления во многом вызваны сложной внутренней организацией наноматериала, типичной для нитридов, и многообразием форм ее существования [5,6]. Ранее было показано [6], что характер организации наноматериала, количественно охарактеризованный с помощью мультифрактального параметра степени разупорядоченности наноматериала (степень нарушения локальной симметрии Δ_p) во многом определяет подвижность носителей заряда в слоях нитрида галлия. Установлено [6], что по мере улучшения упорядоченности наноматериала, сопровождающегося уменьшением значений параметра Δ_p по абсолютной величине, наблюдается рост подвижности носителей заряда более чем на порядок. Кроме того, по мере увеличения параметра Δ_p в слоях нитрида галлия наблюдается переход от классического механизма транспорта носителей заряда к механизму, типичному для низкоразмерных структур [6]. Следует отметить, что при изучении проблем надежности AlGaN/GaN-HEMT и подвижности носителей заряда в двумерном канале роль разупорядоченности наноматериала, как правило, не рассматривается.

В данной работе приведены первые экспериментальные результаты по корреляции подвижности носителей заряда в двумерном канале AlGaN/GaN-HEMT-структур и надежности транзисторов со степенью разупорядоченности наноматериала.

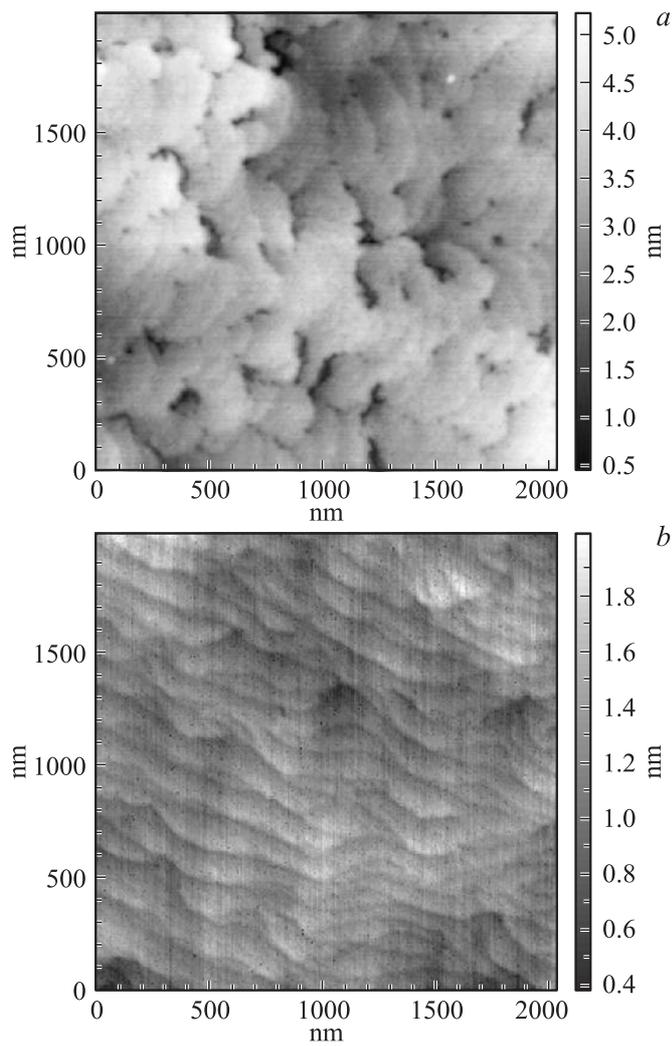


Рис. 1. Изображения морфологии поверхностей AlGaIn/GaN-HEMT-структур с разной степенью разупорядоченности наноматериала (Δ_p): *a* — $\Delta_p = 0.357$; *b* — $\Delta_p = 0.345$, полученные методом атомно-силовой микроскопии.

Эксперименты проводились на AlGaIn/GaN-HEMT-структурах, выращенных методом MOCVD, конструктивные и технологические подробности приведены в [7]. Изменение условий роста зародышевого и буферного слоев HEMT-структур заметно изменяет характер роста слоев активной области и характер организации наноматериала. Причем, как было показано ранее [6], эти изменения находят отражение в морфологии растущих слоев. Улучшение упорядоченности наноматериала проявляется в переходе к слоевому росту и уменьшению неоднородных включений трехмерного характера роста в структуре. Эти изменения хорошо видны на изображениях поверхностей двух HEMT-структур с отличающимся характером организации наноматериала, представленных на рис. 1. Наблюдаемые изменения характера организации наноматериала количественно охарактеризованы с помощью мультифрактального параметра Δ_p по ранее разработанной и успешно апробированной на слоях и светоизлучающих структурах методике [6]. В работе [6] показано, что обработка математического множества, соответствующего изображению поверхности слоя или структуры в атомно-силовом микроскопе, методами мультифрактального анализа по программе MFDROM [8] позволяет количественно охарактеризовать степень нарушения локальной симметрии (степень упорядоченности, разупорядоченности) с помощью мультифрактального параметра Δ_p . Точность определения мультифрактального параметра $\Delta_p \pm 0.002$ оценивалась по нескольким полям сканирования. Увеличение значений параметра Δ_p по абсолютной величине коррелирует с увеличением разупорядоченности наноматериала и проявляется в усложнении морфологии поверхности структур, в увеличении протяженности дислокационных стенок и количества скоплений дислокаций с одновременным увеличением неоднородности их распределения, хотя увеличение общей плотности одиночных дислокаций при этом может не наблюдаться. Из этих двух типов HEMT-структур с разными значениями Δ_p в ЗАО „Светлана-Электронприбор“ были изготовлены транзисторы с топологией, приведенной в [7], а также образцы с омическими контактами для измерения подвижности электронов в двумерном канале HEMT-структур методом Ван-дер-Пау.

На рис. 2 представлены температурные зависимости подвижности электронов в двумерном канале, разительно отличающиеся для структур с разными значениями Δ_p . Эта разница проявляется в значениях плотности электронов и подвижности в двумерном канале, а также в характерной для структур с плохой упорядоченностью наноматериала

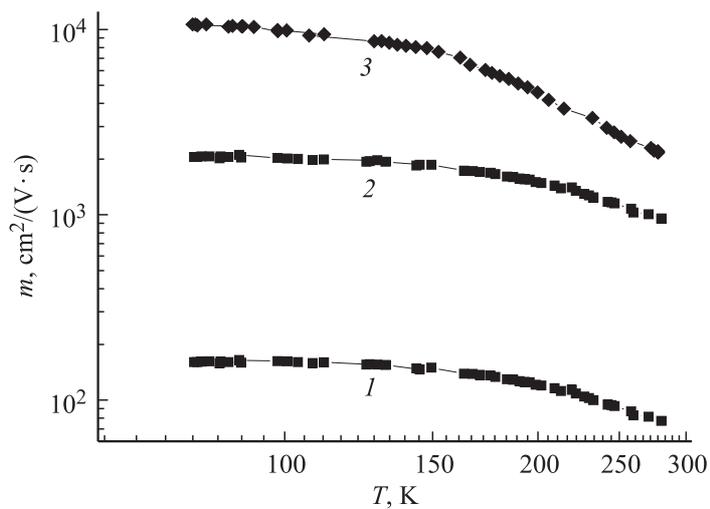


Рис. 2. Температурные зависимости подвижности электронов в AlGaIn/GaN-HEMT-структурах: кривые 1 и 2 (по разным парам контактов) — $\Delta_p = 0.357$; кривая 3 — $\Delta_p = 0.345$.

($\Delta_p = 0.357$) неоднородностью свойств, проявляющейся в существенной разнице подвижностей электронов по разным парам контактов при одинаковом их контактном сопротивлении (рис. 2, кривые 1 и 2). Для оценки надежности параметров НЕМТ-структур был использован стандартный метод контроля [2,3] по изменению тока затвора после приложения смещения -50 V в течение 250 ч. На транзисторах, полученных из структур с $\Delta_p = 0.357$, рост тока затвора более чем на порядок и падение выходной мощности наблюдаются через несколько минут, а на части транзисторов, без применения теста, после повторных включений. На транзисторах, полученных из структур с улучшенной организацией наноматериала ($\Delta_p = 0.345$) падение выходной мощности наблюдается через сотни часов, причем при повышенных температурах 300°C . Полученные результаты позволяют предполагать, что дальнейшее совершенствование характера организации наноматериала НЕМТ-структур будет способствовать повышению надежности параметров транзисторов. Корреляция подвижности с параметром Δ_p , по существу, является проявлением фрактальной природы, типичной для нитридов, демонстри-

рующих дробную размерность слоев [6], светоизлучающих структур [9] и НЕМТ-структур [10]. Для фрактальных систем типичными являются неоднородное распределение электрических, оптических, механических свойств и их корреляция с характером организации фрактальных агрегатов, а также перколяционные явления [11]. Неоднородное распределение свойств приводит к неоднородному протеканию тока, с формированием локальных областей перегрева.

Таким образом, причины, рассмотренные в работах [1–4], приводящие к увеличению тока утечки затвора и падению выходной мощности и частоты AlGaIn/GaN-НЕМТ при эксплуатации имеют общие корни, во многом связанные с характером организации наноматериала, со степенью его разупорядоченности. Представляется, что количественный контроль степени разупорядоченности наноматериала AlGaIn/GaN-НЕМТ-структур позволит лучше понять физику явлений, происходящих в транзисторах при эксплуатации, и будет способствовать совершенствованию технологии роста и увеличению надежности транзисторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение № 14.574.21.0116, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57414XO116).

Список литературы

- [1] Kim H., Tilak V., Green V.M., Cha H., Smart J.A. // Phys. Stat. Sol. (a). 2001. V. 188. P. 203–206.
- [2] Marko P., Meneghini M., Bychikhin S., Meneghesso G., Pogany D. // Microelectron. Reliability. 2012. V. 52. P. 2194–2199.
- [3] Richard Lossy, Herve Blanck, Joachim Wurfl // Microelectron. Reliability. 2012. V. 52. P. 2144–2148.
- [4] Lambert B., Labat N., Carisetti D., Brunel L., Mermoux M. // Microelectron. Reliability. 2012. V. 52. P. 2184–2187.
- [5] Lymparakis L. et al. // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 93. P. 196–401.
- [6] Shmidt N.M., Kolmakov A.G., Emtsev V.V., Lundin W.V. // Nanotechnology. 2001. V. 12. P. 471–474.
- [7] Shalygin V.A., Vorobjev L.E., Firsov D.A., Sofronov A.N., Melentyev G.A., Lundin W.V., Sakharov A.V., Tsatsulnikov A.F. // J. Appl. Phys. 2011. V. 109. P. 073 108.
- [8] Встовский Г.В., Колмаков А.Г., Бунин И.Ж. Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов. М.: Центр, 2001. 116 с.

- [9] *Shalygin V.A., Vorobjev L.E., Firsov D.A., Sofronov A.N., Melentyev G.A., Lundin W.V., Sakharov A.V., Tsatsulnikov A.F.* // J. Appl. Phys. 2011. V. 109. P. 073 108.
- [10] *Shabunina E., Averkiev N., Chernyakov A., Levinshtein M., Petrov P., Shmidt N.* // Phys. Status Solidi C: Curr. Top. Solid State Phys. 2013. V. 10. P. 335–337.
- [10] *Torkhov N.A., Novikov V.A.* // Semiconductors. 2011. V. 45. P. 69–74.
- [11] *Морозовский А.Е., Снарский А.А.* // ЖЭТФ. 1989. V. 95. P. 1844–1849.