

Увеличение порогового напряжения отпираания силовых GaN-транзисторов при использовании низкотемпературной обработки в потоке атомарного водорода

© Е.В. Ерофеев¹, И.В. Федин², И.В. Кутков², Ю.Н. Юрьев³

¹ Научно-исследовательский институт систем электрической связи
Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники,
634034 Томск, Россия

² АО «Научно-производственная фирма „Микран“»,
634045 Томск, Россия

³ Физико-технический институт Национального исследовательского
Томского политехнического университета,
634050 Томск, Россия

E-mail: erofeev@micran.ru

(Получена 26 апреля 2016 г. Принята к печати 5 мая 2016 г.)

Транзисторы с высокой подвижностью электронов на основе эпитаксиальных гетероструктур AlGaIn/GaN являются перспективной элементной базой для создания устройств силовой электроники следующего поколения. Это обусловлено как высокой подвижностью носителей заряда в канале транзистора, так и высокой электрической прочностью материала, позволяющей достичь высоких напряжений пробоя. Для применения в силовых коммутационных устройствах требуются нормально-закрытые GaN-транзисторы, работающие в режиме обогащения. Для создания нормально-закрытых GaN-транзисторов чаще всего используют подзатворную область на основе GaN *p*-типа проводимости, легированного магнием (*p*-GaN). Однако оптимизация толщины эпитаксиального слоя *p*-GaN и уровня легирования позволяет добиться порогового напряжения отпираания GaN-транзисторов, близкого к $V_{th} = +2$ В. В настоящей работе показано, что применение низкотемпературной обработки в потоке атомарного водорода подзатворной области на основе *p*-GaN перед осаждением слоев затворной металлизации позволяет увеличить пороговое напряжение транзистора до $V_{th} = +3.5$ В. Наблюдаемые эффекты могут быть обусловлены формированием дипольного слоя на поверхности *p*-GaN, индуцированного воздействием атомарного водорода. Термическая обработка GaN-транзисторов, подвергшихся водородной обработке, в среде азота при температуре $T = 250^\circ\text{C}$ в течение 12 ч не выявила деградации электрических параметров транзистора, что может быть обусловлено формированием термически стабильного дипольного слоя на границе раздела металл/*p*-GaN в результате гидрогенезации.

DOI: 10.21883/FTP.2017.02.44114.8298

1. Введение

Появившись в середине 70-х годов прошлого века, силовые MOSFETs (metal–oxide–semiconductor field effect transistors) на основе кремния (Si) благодаря большей скорости переключения и высокой эффективности по сравнению с биполярными транзисторами стали повсеместно использоваться в силовой электронике: в источниках питания, DC–DC-преобразователях, контроллерах двигателей и пр. Однако сейчас, после непрерывного развития в течение более трех десятилетий, производительность MOSFETs на основе Si достигла своего теоретического предела. Следующим шагом в развитии силовой электроники стало появление мощных транзисторов на основе нитрида галлия (GaN) [1].

Уникальные физические характеристики нитрида галлия в сравнении с кремнием позволяют достигнуть значительных усовершенствований приборов: понижения сопротивления открытого канала, роста скоростей переключения, сохранения надежности при высоких уровнях температуры и радиации, уменьшения размеров упаковки [2]. Возможность очень быстрого переключения

практически без потерь, появляющаяся при использовании GaN-транзисторов, означает возможность увеличить эффективность и уменьшить размер преобразователя, а также уменьшить себестоимость его изготовления за счет отказа от ряда дорогостоящих пассивных элементов (фильтров) схемы.

Для применения в силовой электронике необходимы нормально-закрытые GaN-транзисторы, работающие в режиме обогащения [3]. Для создания нормально-закрытых GaN-транзисторов чаще всего используют подзатворную область на основе GaN *p*-типа проводимости, легированного магнием (*p*-GaN).

При этом пороговое напряжение отпираания транзистора с подзатворной областью на основе *p*-GaN определяется главным образом толщиной эпитаксиального слоя *p*-GaN и уровнем его легирования. Оптимизация данных параметров позволяет добиться порогового напряжения отпираания GaN-транзисторов, близкого к $V_{th} = +2$ В, что делает их несовместимыми с работой типовых драйверов управления кремниевыми MOSFETs. Таким образом, актуальной является задача

повышения порогового напряжения отпираания силовых GaN-транзисторов с подзатворной областью на основе p -GaN.

Известно, что выращенные с помощью метода молекулярно-лучевой эпитаксии слои GaN, легированные магнием (Mg), характеризуются p -типом проводимости [4]. В работе [5] показано, что термическая обработка слоя p -GaN при температуре 600°C в атмосфере NH_3 приводит к уменьшению его слоевого сопротивления на 6 порядков, в то время как аналогичная термообработка в атмосфере N_2 не приводит к заметным изменениям. Таким образом, было установлено, что взаимодействие атомов водорода с тонкими эпитаксиальными слоями p -GaN приводит к изменению их электрических характеристик в результате образования устойчивых соединений Mg–H [6,7].

Целью настоящей работы является исследование влияния низкотемпературной обработки в потоке атомарного водорода подзатворной области на основе p -GaN перед осаждением слоев затворной металлизации на электрические характеристики нормально-закрытых силовых GaN-транзисторов.

2. Методики эксперимента

В экспериментах использовались эпитаксиальные гетероструктуры типа p -GaN/AlGaIn/GaN, выращенные методом металлоорганической газовой эпитаксии на подложках кремния диаметром 100 мм. Гетероструктура включала в себя буферный слой на основе легированного углеродом GaN, толщиной 4 мкм, каналный слой GaN толщиной 400 нм, спейсер AlN толщиной 1 нм, барьерный слой $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$ толщиной 20 нм и слой p -GaN, легированный магнием. Толщина слоя p -GaN составляла 50 нм, концентрация атомов магния определялась методом вторично-ионной масс-спектрографии и составляла $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Подзатворная область на основе p -GaN формировалась селективным плазмохимическим травлением. После формирования межприборной изоляции на пластине осуществлялось формирование омических контактов на основе Ti/Al/Mo/Au и Pd-затворов.

Перед осаждением затворов на основе палладия методом электронно-лучевого испарения в вакууме образцы подвергались обработке *in situ* в потоке атомарного водорода с плотностью потока атомов $j > 10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ в течение времени $t = 10\text{--}60 \text{ с}$ при комнатной температуре. Для проведения экспериментов использовался источник атомарного водорода, описанный в работе [8].

Механизмы взаимодействия водорода с эпитаксиальными слоями p -GaN исследовались с помощью инфракрасной (ИК) спектроскопии. Электрические параметры GaN-транзисторов по постоянному току исследовались с помощью измерителя характеристик полупроводниковых приборов HP4156A.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлено микроскопическое изображение сформированных мощных GaN-транзисторов с шириной затворной металлизации 10 мм. Длины подзатворной области p -GaN, а также самого затвора составляли 1.8 и 0.8 мкм соответственно. Расстояния затвор–исток и сток–исток составляли 1 и 7.5 мкм соответственно.

Транзисторы на основе эпитаксиальных гетероструктур p -GaN/AlGaIn/GaN с необработанной в потоке атомарного водорода подзатворной областью p -GaN работали в режиме обеднения со значением порогового напряжения $V_{\text{th}} = -1.4 \text{ В}$. Сопротивление канала транзистора в открытом состоянии составило $R_{\text{on}} = 2.4 \text{ мОм} \cdot \text{см}^2$, а напряжение пробоя сток–исток в закрытом состоянии $V_{d-s} = 250 \text{ В}$ при расстоянии сток–исток 7.5 мкм.

На рис. 2 представлена зависимость порогового напряжения отпираания транзистора на основе p -GaN/AlGaIn/GaN от времени обработки в потоке атомарного водорода. Видно, что водородная обработка подзатворной области p -GaN в течение $t = 10 \text{ с}$ при

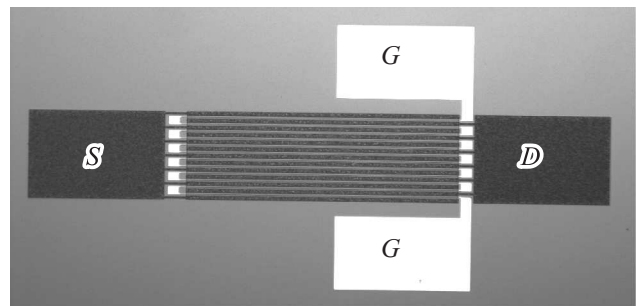


Рис. 1. Микроскопическое изображение транзистора на основе p -GaN/AlGaIn/GaN/Si с шириной затвора 10 мм. S — исток, D — сток, G — затвор.

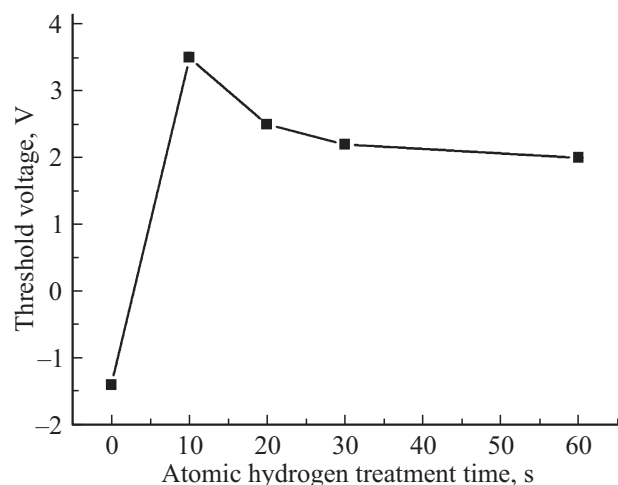


Рис. 2. Зависимость порогового напряжения транзистора на основе p -GaN/AlGaIn/GaN от времени обработки в потоке атомарного водорода.

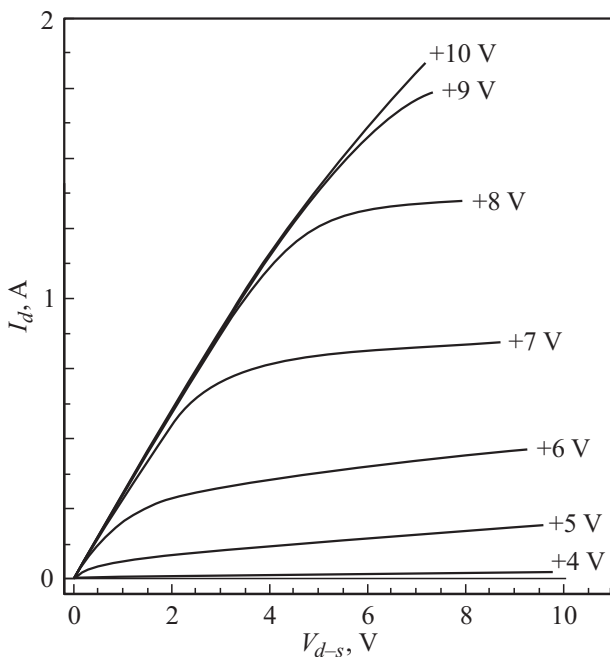


Рис. 3. Выходная характеристика транзистора на основе p -GaN/AlGaN/GaN/Si с шириной затвора 10 мм, изготовленного с применением водородной обработки в течение $t = 10$ с.

комнатной температуре перед формированием затворной металлизации на основе пленки палладия позволяет увеличить пороговое напряжение отпираания GaN-транзистора до $V_{th} = +3.5$ В. При этом дальнейшее увеличение времени обработки с $t = 10$ до 60 с приводит к уменьшению данной величины до $V_{th} = +2$ В, что может быть обусловлено проникновением (диффузией) атомов водорода в глубь подзатворной области на основе p -GaN толщиной 50 нм.

На рис. 3 представлены вольт-амперные характеристики $I_d(V_{d-s})$ GaN-транзистора, полученного при использовании кратковременной ($t = 10$ с) обработки подзатворной области p -GaN в потоке атомарного водорода. Транзистор имеет электрические характеристики, аналогичные характеристикам GaN-транзисторов, изготовленных без применения водородной обработки, однако работает в режиме обогащения с величиной порогового напряжения отпираания $V_{th} = +3.5$ В и током насыщения сток–исток $I_{sat} = 0.2$ А/мм при напряжении затвор–исток $V_{g-s} = +10$ В.

На рис. 4 и 5 представлены результаты исследования методом ИК спектроскопии поглощения поверхности слоев p -GaN толщиной 50 нм, без обработки и прошедших обработку слоя p -GaN в потоке атомарного водорода в течение $t = 10$ и 60 с при комнатной температуре. Данные рис. 4 и 5 свидетельствуют о том, что обработка подзатворной области p -GaN в потоке атомарного водорода при комнатной температуре в течение $t = 10$ с приводит к формированию соединений Mg–H на поверхности, а также уменьшению концентрации

акцепторов Mg (уровня легирования) в объеме p -GaN. Увеличение времени водородной обработки до $t = 60$ с приводит к стимулированному росту количества связей Mg–H и дальнейшему уменьшению уровня легирования слоя p -GaN.

Для объяснения наблюдаемых эффектов может быть предложен следующий механизм. После кратковременной ($t = 10$ с) обработки подзатворной области на основе p -GaN в потоке атомарного водорода на поверхности полупроводника в результате образования связей Mg–H формируется дипольный слой, индуцированный водородом. Наличие данного дипольного слоя на границе раздела Pd/ p -GaN приводит к росту порогового напряжения отпираания GaN-транзистора посредством увеличения высоты барьера Шоттки [9].

Дальнейшее увеличение времени обработки в потоке атомарного водорода приводит к его проникновению в слой p -GaN, а также увеличению количества сформированных связей Mg–H на поверхности. Диффузия атомов

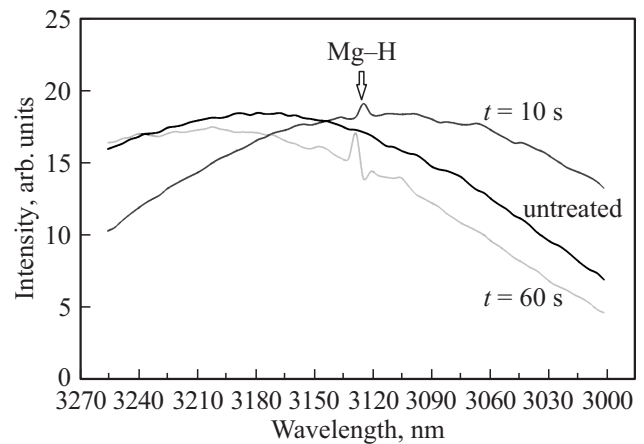


Рис. 4. Поглощение связями Mg–H в ИК спектрах необработанных слоев p -GaN и слоев p -GaN, подвергшихся обработке в потоке атомарного водорода в течение 10 и 60 с.

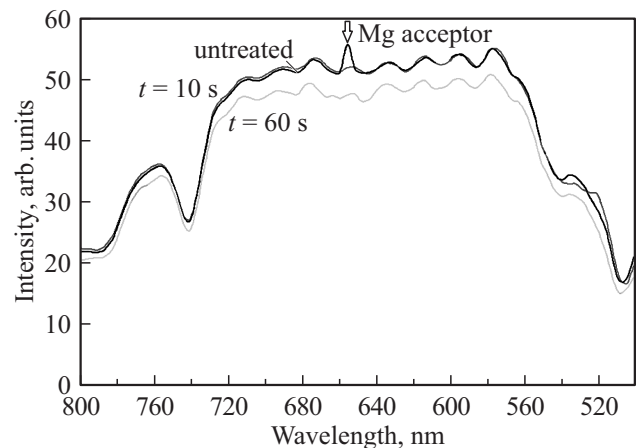


Рис. 5. Поглощение акцепторами Mg в ИК спектрах необработанных слоев p -GaN и слоев p -GaN, подвергшихся обработке в потоке атомарного водорода в течение 10 и 60 с.

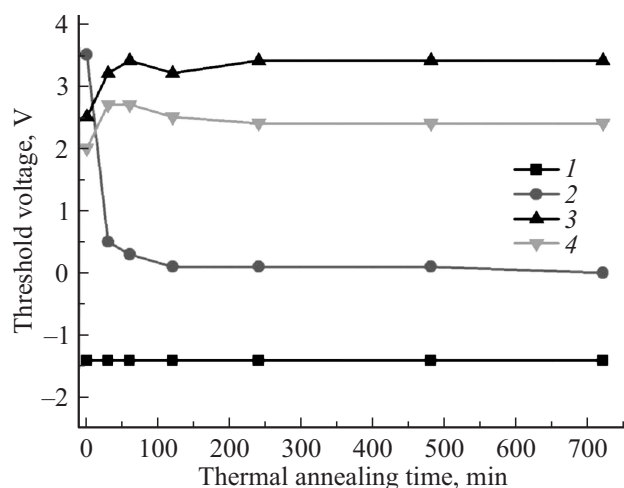


Рис. 6. Зависимость от времени термической обработки в среде азота при 250°C порогового напряжения транзисторов без обработки в атомарном водороде (1) и подвергшихся обработке в потоке атомарного водорода в течение $t = 10$ (2), 20 (3), 60 с (4).

водорода в глубь слоя p -GaN приводит к снижению уровня его легирования, что в свою очередь приводит к последующему уменьшению порогового напряжения отпириания транзистора.

На рис. 6 представлены результаты исследования термической стабильности порогового напряжения отпириания GaN-транзисторов без обработки (кривая 1) и прошедших обработку в потоке атомарного водорода слоя p -GaN в течение $t = 10, 20$ и 60 с (кривые 2–4) при комнатной температуре. Термическая обработка проводилась при температуре 250°C в течение $t = 0.5–12$ ч в среде азота.

Данные рис. 6 свидетельствуют о том, что термическая обработка GaN-транзисторов с подзатворной областью p -GaN, обработанной в течение $t = 10$ с в потоке атомарного водорода, приводит к снижению величины порогового напряжения с $V_{th} = +3.5$ В до $+0.5$ В. При этом в GaN-транзисторах с подвергшимся водородной обработке слоем p -GaN в течение $t = 20$ и 60 с заметной деградации порогового напряжения не наблюдается.

Высокая термическая стабильность, наблюдаемая на рис. 6, может быть объяснена формированием индуцированного водородом термостабильного дипольного слоя на границе раздела металл/ p -GaN.

4. Заключение

Мощные GaN-транзисторы на основе эпитаксиальных гетероструктур AlGaIn/GaN, работающие в режиме обогащения, являются перспективной элементной базой для создания устройств силовой электроники следующего поколения. Для получения нормально-закрытых

GaN-транзисторов чаще всего используется подзатворная область на основе слоя p -GaN. При этом оптимизация его толщины и уровня легирования позволяет достичь величины порогового напряжения отпириания транзистора $V_{th} = +2$ В.

В настоящей работе показано, что использование кратковременной низкотемпературной обработки в потоке атомарного водорода подзатворной области p -GaN перед осаждением слоев затворной металлизации позволяет увеличить пороговое напряжение отпириания транзистора до $V_{th} = +3.5$ В. Наблюдаемые эффекты могут быть обусловлены формированием дипольного слоя на поверхности p -GaN, индуцированного воздействием атомарного водорода.

Термическая обработка GaN-транзисторов, подвергшихся водородной обработке в среде азота при температуре 250°C в течение $t = 12$ ч, не выявила деградации электрических параметров транзистора, что может быть обусловлено формированием термически стабильного дипольного слоя на границе раздела металл/ p -GaN в результате гидрогенизации.

Авторы работы выражают благодарность коллективу Научно-производственного комплекса „Микроэлектроника“ АО Научно-производственной фирмы „Микран“ и коллективу Научно-образовательного центра „Нанотехнологии“ Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники за содействие в проведении экспериментальной части работы и обсуждение результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках соглашения № 14.577.21.0204 от 27.10.15 II: уникальный идентификатор проекта RFNEFI57715X0204.

Список литературы

- [1] M. Briere. *GaN-based Power Device Platform. The arrival of a new paradigm in conversion technology.* www.powersystemdesign.com
- [2] M. Germain, K. Hodson, H. Kawai, T. Kobayashi, E. Ysewijn. *Power Devices*, **4**, 6 (2012).
- [3] J. Würfl, O. Hilt, E. Bahat-Treidel, R. Zhytnytska, K. Klein, P. Kotara, F. Brunner, A. Knauer, O. Krüger, M. Weyers, G. Tränkle. *ECS Trans.*, **52** (1), 979 (2013).
- [4] T.D. Moustakas, R. Molnar. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **281**, 753 (1993).
- [5] S. Nakamura, N. Ivasa, M. Senoh, T. Mikai. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31**, 1258 (1992).
- [6] J. Neugebauer, C.G. Van de Walle. *Phys. Rev. Lett.*, **75**, 4452 (1995).
- [7] W. Gotz, N.M. Johnson, J. Walker, D.P. Bour, R.A. Street. *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 667 (1996).
- [8] Е.В. Ерофеев, В.А. Кагадей. *Микроэлектроника*, **41** (2), 1 (2012).
- [9] G. K. Reeves, H. V. Harrison. *IEEE Electron Dev. Lett.*, **3** (5), 111 (1982).

Редактор Л.В. Шаронова

Improve of the threshold voltage of high voltage GaN transistors by low temperature atomic hydrogen treatment

E.V. Erofeev¹, I.V. Fedin², I. Kutkov², Y. Yuryev³

¹ Research Institute
of Electrical Communication Systems
of Tomsk State University
of Control Systems and Radioelectronics,
634050 Tomsk, Russia

² Research & Production Company „Micran“,
634041 Tomsk, Russia,

³ Institute of Physics and Technology,
National Research Tomsk Polytechnic University,
634050 Tomsk, Russia

Abstract AlGaN/GaN HEMT is one of attractive candidates for next generation high power devices because of high carrier mobility in two-dimensional electron gas channels and high breakdown voltage. In order to apply the AlGaN/GaN HEMTs for power switching applications the normally off operation is required. Enhancement type behavior of GaN HEMT transistors is obtained by using *p*-type Mg-doped GaN gate structures. The optimized epitaxial designs enable threshold voltage close to $V_{th} = +2$ V. In present work, it is shown that atomic hydrogen treatment of the Mg doped *p*-GaN before gate metal evaporation can increase the threshold voltage up to $V_{th} = +3.5$ V. It can be caused by the hydrogen-induced dipole layer formation at the *p*-GaN semiconductor interface after atomic hydrogen treatment. No visible parameters degradation after thermal annealing at $T = 250^\circ\text{C}$ for 12 h in nitrogen environment was observed. It can be explained by the formation thermally stable Mg–H complexes in the *p*-GaN layer after hydrogenation.