

Влияние обработки поверхности в BCl_3 плазме на формирование омических контактов к структурам AlGaIn/GaN

© Н.А. Андрианов,¹ А.А. Кобелев,² А.С. Смирнов,² Ю.В. Барсуков,³ Ю.М. Жуков⁴

¹ ЗАО Светлана Рост,
194100 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

³ Самсунг Электроникс, Самсунг Электроникс 1,
445701 Хуасон, Кенкидо, Южная Корея

⁴ Санкт-Петербургский государственный университет,
199034 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: andrianov.nickolai@gmail.com

(Поступило в Редакцию 9 марта 2016 г. В окончательной редакции 6 июля 2016 г.)

Установлен режим обработки поверхности верхнего прикрывающего слоя GaN (*cap*-слой) в AlGaIn/GaN НЕМТ структурах плазмой BCl_3 , позволяющий существенно снизить сопротивление омических контактов на структурах полевых транзисторов на основе нитридов III группы. Достигнутый результат объясняется главным образом эффективным уменьшением потенциального барьера на поверхности GaN за счет образования вакансий азота (донорные центры) и соответственно за счет роста поверхностной концентрации электронов.

DOI: 10.21883/JTF.2017.03.44248.1793

Введение

В последние два десятилетия большое развитие получили технологии приборов на основе нитридов III группы [1,2], интерес к которым обусловлен возможностью их работы в жестких условиях высоких температур и агрессивных сред [3]. AlGaIn/GaN -структуры типа полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов (НЕМТ-структуры) перспективны для создания мощных высокочастотных приборов за счет сочетания высоких пробивных электрических полей и высоких значений насыщенной дрейфовой скорости электронов в них [4]. Проблема создания омических контактов к AlGaIn/GaN НЕМТ-структурам является одной из ключевых в создании мощных полевых транзисторов на этой основе, поскольку от качества контактов в значительной степени зависят эксплуатационные характеристики таких приборов (максимальная выходная мощность, тепловые потери за счет джоулева нагрева контактных областей и т.д.) [5,6]. В недавней работе [7] для формирования низкоомного контакта к AlGaIn/GaN -структуре применялась плазменная обработка верхнего *cap*-слоя GaN с помощью индуктивного разряда (Inductively Coupled Plasma или ICP-режим) в газе BCl_3 . В данном режиме скорость травления GaN слоя была равной нулю на временах обработки образца. Авторы [7] также показали, что низкое контактное сопротивление было достигнуто в результате удаления поверхностного окисла и образования вакансионных дефектов в поверхностном слое GaN в результате плазменной обработки. Однако детали технологического режима обработки и процессов, протекающих на поверхности слоя GaN

при такой обработке, остались неясными. В работе [8] нами показано, что при обработке AlGaIn/GaN -гетероструктур с верхним *cap*-слоем GaN толщиной 20 Å в плазме BCl_3 в ICP-режиме с нулевым смещением на подложке на поверхности образуется слой V_xCl_y , который приводит к росту контактного сопротивления в сравнении с необработанной частью образца. Это было объяснено недостаточно высокой энергией ионов BCl_x^+ для удаления поверхностного окисла и нежелательного диэлектрического слоя V_xCl_y .

В настоящей работе была применена плазма индуктивного разряда (ICP-режим) для обработки поверхности GaN в газе BCl_3 совместно с подачей дополнительного напряжения смещения на подложку (рис. 1), которое позволяет изменять энергию бомбардирующих образец ионов независимо от источника мощности индуктивного разряда и соответственно от потока ионов [9,10] (Inductively Couple Plasma Reactive Ion Etching или ICP-RIE-режим). Установлены оптимальные энергии ионов, обработка которыми дает заметное уменьшение контактного сопротивления. Методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS) показано, что оптимальный режим ICP-RIE обработки позволяет существенно уменьшить поверхностный окисел и потенциальный барьер на поверхности GaN за счет образования донорных центров в поверхностном слое.

Детали эксперимента

Исследования проводились на AlGaIn/GaN НЕМТ-структуре с 20 Å GaN *cap*-слоем, выращенной методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МВЕ) на

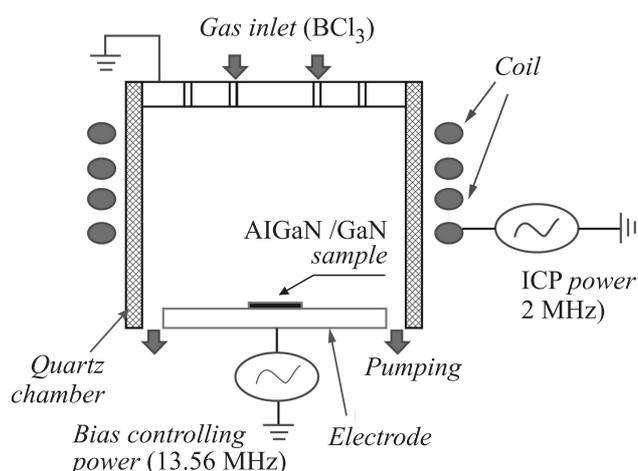


Рис. 1. Схема экспериментальной установки ICP-RIE.

полуизолирующей 4H-SiC подложке диаметром 2 inch. Подвижность и концентрация двумерного электронного газа были измерены бесконтактным СВЧ методом на установке LEI-1605 непосредственно после процесса роста и составили: $1800 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ и $1.3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ соответственно. На структуре была произведена фотолитография для формирования омических контактов с последующей обработкой в кислородной плазме в течение 1 min для удаления возможных остатков органики после процесса фотолитографии, и обработка в 3% водном растворе HCl для удаления окисла с поверхности структуры. Далее пластина помещалась в камеру установки, где поочередно обрабатывались три из четырех четвертей в разряде BCl_3 в ICP-RIE-режиме. При этом необрабатываемые четверти закрывались кварцевой маской. Каждая четверть обрабатывалась в течение 1 min. Для обработки применялся следующий режим: рабочее давление в камере — 10 mTorr, поток газа BCl_3 — 10 sccm. Мощность индуктивного разряда фиксировалась на протяжении всего эксперимента и составляла 200 W при частоте 2 MHz. Мощность источника напряжения смещения при частоте 13.56 MHz варьировала так, чтобы зафиксировать величину напряжения смещения 20, 40 и 60 V и, как следствие, среднюю энергию ионов, бомбардирующих подложку, пропорциональной этим напряжениям и близким к ним по величине. Четвертая четверть пластины не обрабатывалась, т.е. служила референтной частью. После этого пластина незамедлительно помещалась в установку электронно-лучевого напыления металлов, где напылялись металлы Ti/Al/Ni/Au. Далее последовательно производилось оплавление (RTA) омических контактов при температуре 830°C в атмосфере азота и травление межприборной изоляции в плазме BCl_3/Ar , а затем и измерение контактного сопротивления методом длинной линии (TLM).

Для детального понимания процессов, происходящих на поверхности верхнего GaN *cap*-слоя НЕМТ-структуры в результате плазменной обработки были про-

ведены XPS-исследования. Для этого мы подготовили пластину, которая была выращена методом МВЕ в одном процессе с образцом, описанным выше. Далее пластина прошла обработку в кислородной плазме и 3% водном растворе HCl. После этого пластина была разделана на три части (три тестовых образца). Два из трех образцов прошли обработку в BCl_3 -плазме на установке ICP-RIE в режиме, описанном выше. Первый образец обрабатывался при напряжении смещения на подложке 20 V, а второй при напряжении смещения, равном 40 V. Третий образец был референтным и не обрабатывался.

Исследования химического состава и валентной зоны поверхностного слоя GaN проводились методом XPS на комплексном фотоэлектронном и растровом оже-электронном спектрометре Thermo Fisher Scientific Escalab 250Xi. Поверхностный химический состав слоя GaN определялся путем отслеживания основных уровней Ga3d, N1s, O1s. Для измерения фотоэлектронных спектров использовался лабораторный источник монохроматизированного рентгеновского излучения ($\text{AlK}\alpha$) с энергией фотонов 1486.6 eV с одновременным использованием электронно-ионной системы компенсации заряда поверхности образца.

Результаты и их обсуждение

По результатам TLM-измерений на пластине, прошедшей обработку в BCl_3 -плазме перед формированием омических контактов, были получены следующие значения сопротивлений омических контактов (см. таблицу).

Как видно из таблицы, в результате обработки поверхности 20 Å GaN *cap*-слоя НЕМТ-структуры в ICP-RIE-режиме с напряжением смещения на подложке, равным 40 V, удалось получить ощутимое снижение сопротивления омических контактов по сравнению с референтным образцом, т.е. по сравнению с необработанной частью подложки (уменьшение контактного сопротивления достигает 15%). Однако при обработке поверхности GaN с напряжением смещения на подложке, равным 60 V, наблюдается незначительное уменьшение контактного сопротивления лишь на 4% относительно референтной области. При обработке же с напряжением

Результаты измерения сопротивления омических контактов и скоростей травления на образцах, обработанных в ICP-RIE-режиме в BCl_3 -плазме при различных напряжениях смещения на подложке

Номер четверти пластины	Напряжение смещения, V	Сопротивление омических контактов, $\Omega \cdot \text{mm}$	Скорость травления, A/s
1	20	0.54	~ 0
2	40	0.45	~ 0.3
3	60	0.51	~ 0.5
4	Без обработки	0.53	—

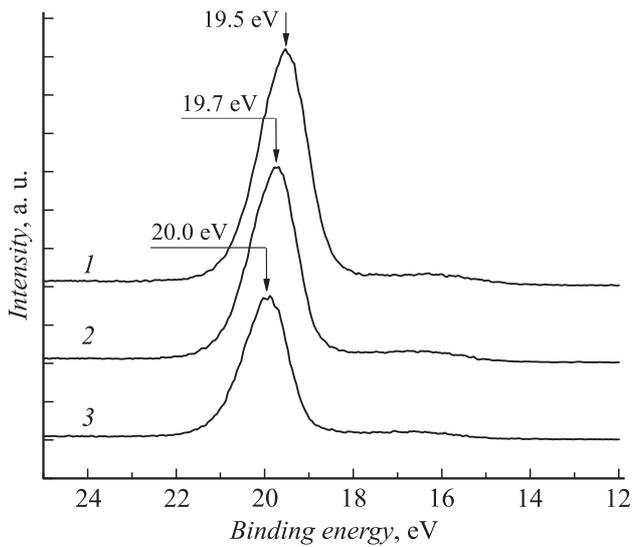


Рис. 2. XPS-спектры энергетического положения уровня $\text{Ga}3d$: 1 — необработанный образец, 2 — обработка в BCl_3 -плазме при напряжении смещения 20 В, 3 — обработка при напряжении смещения 40 В. Стрелки указывают положение максимума XPS-спектров. Спектры смещены по вертикали для ясности.

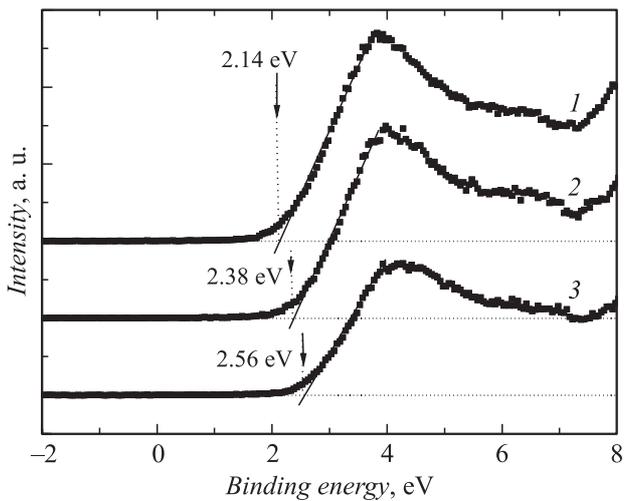


Рис. 3. XPS-спектры потолка валентной зоны: 1 — необработанный образец, 2 — обработка в BCl_3 -плазме при напряжении смещения 20 В, 3 — обработка при напряжении смещения 40 В. Спектры смещены по вертикали для ясности. Точечные линии соответствуют нулевому уровню XPS-сигнала. Прямые линии — результат линейной экстраполяции низкоэнергетического края XPS-спектров. Стрелки указывают точки пересечения уровня нулевого сигнала с результатом линейной экстраполяции XPS-спектров.

смещения на подложке, равным 20 В, наблюдается даже рост контактного сопротивления примерно на 2%.

В первую очередь следует отметить, что обработка поверхности GaN ионами из плазмы BCl_3 со средними энергиями, не превышающими 20 эВ, по-видимому, не позволяет полностью удалять паразитную пленку

V_xCl_y [8] и поверхностный окисел [11], что и приводит к росту сопротивления омических контактов [8]. Необходимо добавить, что при обработке в указанном режиме скорость травления слоев AlGaIn/GaN практически нулевая (0 \AA/s), что было определено с помощью атомно-силовой микроскопии (AFM) после обработки образцов в течение 10 и 20 мин. При обработке поверхности GaN ионами из плазмы BCl_3 со средней энергией 60 эВ наблюдается незначительное снижение контактного сопротивления, но при этом скорость травления слоев AlGaIn/GaN довольно высока и равняется уже $\sim 0.5 \text{ \AA/s}$. Таким образом, можно заключить, что данный режим характеризуется сравнительно высокой скоростью травления, что может привести к полному стравливанию верхнего *cap*-слоя 20 \AA GaN. При этом омический контакт будет формироваться на нижележащем широкозонном эпитаксиальном слое AlGaIn, что сопряжено с более высоким поверхностным барьером и, как следствие этого, более высоким сопротивлением омических контактов [12]. Этим можно объяснить тот факт, что при обработке с напряжением смещения, равным 60 В, контактное сопротивление падает незначительно. Обработка же поверхности GaN в плазме BCl_3 со средней энергией ионов, равной 40 эВ, дает заметное снижение сопротивления омических контактов на AlGaIn/GaN HEMT-структуре. При этом скорость травления слоев AlGaIn/GaN не превысила 0.3 \AA/s . По-видимому, обработка поверхности GaN *cap*-слоя HEMT-структуры в плазме BCl_3 в ICP-RIE-режиме со средними энергиями ионов, равными 40 эВ, позволила эффективно удалить поверхностный окисел и снизить поверхностный барьер за счет формирования на поверхности донорных вакансий азота, что в результате дало заметное уменьшение сопротивления омических контактов.

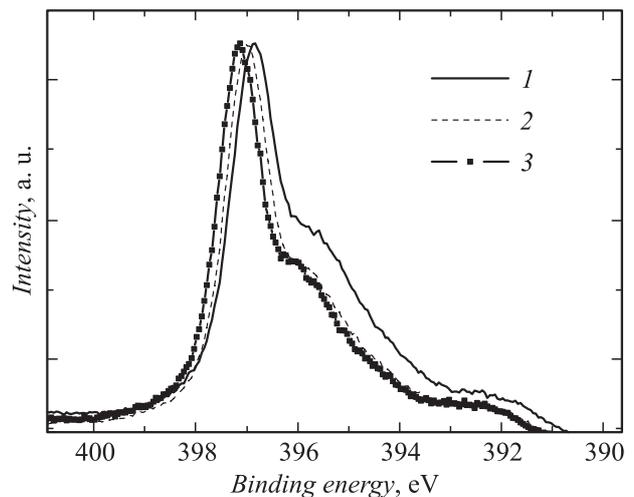


Рис. 4. XPS-спектры энергетического положения уровня $\text{N}1s$. 1 — необработанный образец, 2 — обработка в BCl_3 -плазме при напряжении смещения 20 В, 3 — обработка при напряжении смещения 40 В.

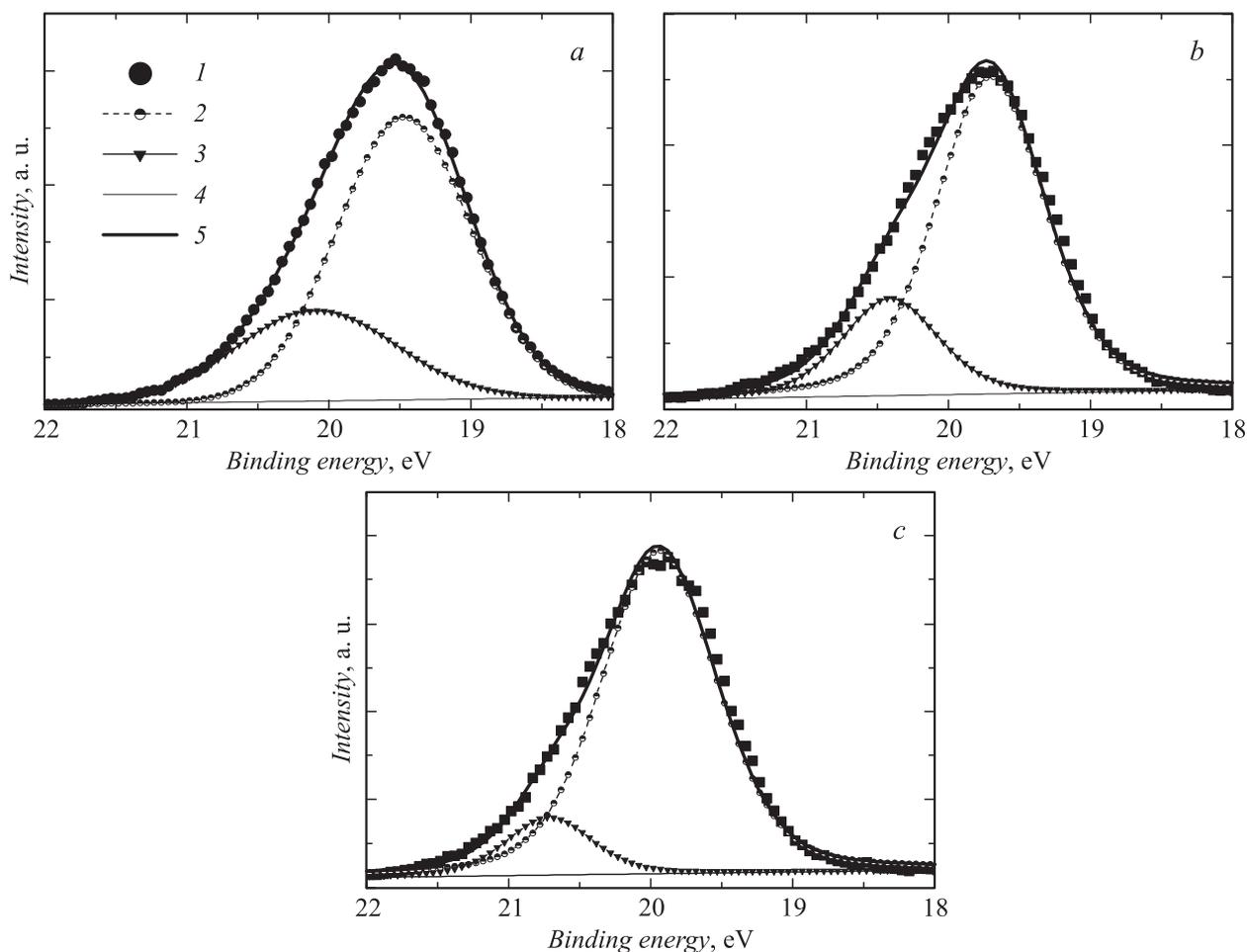


Рис. 5. Разложение XPS-спектра уровня $Ga3d$ на компоненты, отвечающие химическим связям Ga–N и Ga–O, с помощью свертки функций Гаусс–Лоренца: 1 — экспериментальный спектр, 2 — компонента Ga–N, полученная в результате разложения спектра, 3 — компонента Ga–O, 4 — фоновый XPS-сигнал, 5 — полная аппроксимация экспериментального спектра. *a* — необработанный образец, *b* — обработка в BCl_3 -плазме при напряжении смещения 20 В, *c* — обработка при напряжении смещения 40 В.

Для анализа процессов на поверхности GaN проводились XPS-измерения образцов после обработки ионами с энергиями 20 и 40 эВ и без обработки. Образец, подвергнутый обработке ионами с энергией 60 эВ, был исключен из XPS-измерений из-за достаточно высокой скорости травления слоев AlGaIn/GaN и возможности полного стравливания в процессе обработки в течение 1 мин верхнего *cap*-слоя структуры толщиной всего 20 Å.

Как видно из рис. 2, при обработке AlGaIn/GaN НЕМТ-структуры с 20 Å *cap*-слоем GaN в ICP-RIE-режиме энергетическое положение уровня $Ga3d$ сдвигается в сторону больших энергий связи. Такой сдвиг составляет 0.2 и 0.5 эВ в случае обработки с напряжениями смещения на подложке, равными 20 и 40 В соответственно. Сдвиг энергетического положения уровня $Ga3d$ в сторону больших энергий связи может быть объяснен сдвигом поверхностного уровня Ферми (E_F) к дну зоны проводимости (E_c) [13]. Это, в свою очередь, свидетельствует об уменьшении высоты поверхностного барьера (E_b). Такая эволюция высоты потенциального

барьера может происходить в результате образования дефектов донорного типа, таких как вакансии азота (N_v) [14], на поверхности GaN и соответственно за счет роста поверхностной концентрации электронов. При этом наблюдается отмеченное выше уменьшение сопротивления омических контактов.

На рис. 3 представлены XPS-спектры потолка валентной зоны GaN поверхности образцов. Энергия связи 0 эВ на оси абсцисс соответствует энергетическому положению уровня Ферми (E_F) поверхности GaN [15]. Энергетическое положение потолка валентной зоны (E_v) было определено путем линейной экстраполяции низкоэнергетического края XPS-спектра аналогично [7,15]. Экспериментально определенная величина $\Delta = E_F - E_v$ позволяет определить поверхностный барьер (E_b), поскольку $E_b = E_c - E_F = E_g - \Delta$, где E_g — ширина запрещенной зоны, равная для GaN 3.4 эВ. Как видно из рис. 3, обработка в BCl_3 плазме приводит к уменьшению поверхностного барьера. При этом обработка в режиме со средней энергией ионов, равной 40 эВ, является

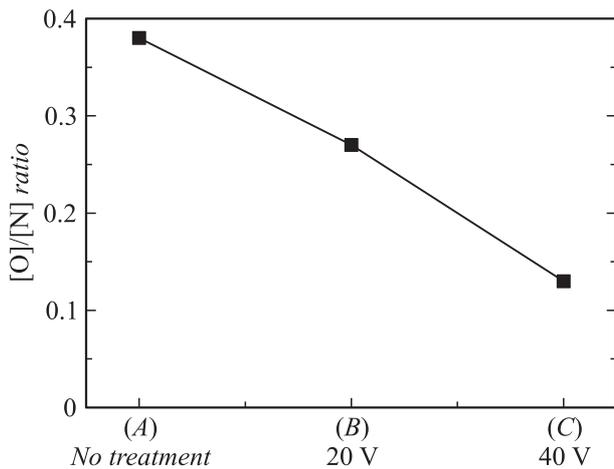


Рис. 6. Отношение площадей компонент Ga–O к Ga–N, полученное из анализа XPS-спектра уровня $\text{Ga}3d$, в зависимости от напряжения смещения при плазменной обработке.

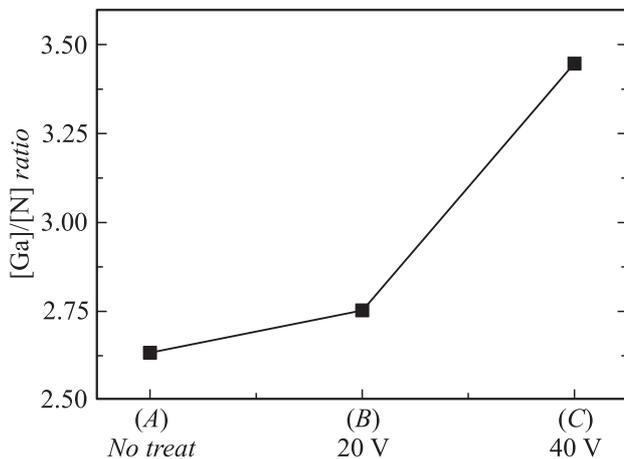


Рис. 7. Отношение Ga/N, полученное из анализа XPS-спектров уровней $\text{Ga}3d$ и $\text{N}1s$, в зависимости от напряжения смещения при плазменной обработке.

наиболее эффективной, так как при этом понижение поверхностного барьера по сравнению с необработанным образцом составляет порядка 420 meV.

Наблюдаемые закономерности в высокоэнергетическом сдвиге уровня $\text{Ga}3d$ и понижении поверхностного барьера мы связываем с образованием донорных вакансий в слое GaN.

На рис. 4 показано изменение энергетического положения уровня $\text{N}1s$ при обработке в BCl_3 -плазме. Видно, что имеет место сдвиг уровня $\text{N}1s$ в сторону больших энергий связи, что ранее отмечалось авторами работы [16]. Это, вероятно, также связано с образованием вакансий азота на поверхности.

На рис. 5 представлено разложение XPS-спектра уровня $\text{Ga}3d$ на компоненты, отвечающие химическим связям Ga–N и Ga–O, используя свертку функций Гаусс–Лоренца. Как можно видеть, в результате обра-

ботки заметно уменьшается доля компоненты, отвечающей Ga–O-связям. Это свидетельствует о том, что при обработке в BCl_3 -плазме происходит эффективное удаление окислов с поверхности GaN. На рис. 6 показано отношение площадей компонент, соответствующих Ga–O и Ga–N, которое наглядно демонстрирует уменьшение окисла на поверхности в результате плазменной обработки. Удаление окисла может происходить за счет образования летучих соединений типа $(\text{BOCl})_x$, как было отмечено в [11,17].

На рис. 7 показано изменение отношения Ga/N в поверхностном слое, полученное из анализа XPS-спектров уровней $\text{Ga}3d$ и $\text{N}1s$. Как можно видеть, в результате плазменной обработки происходит существенное уменьшение содержания азота на поверхности, т. е. определенно имеет место образование азотных вакансий. При этом наиболее насыщенная галлием поверхность образуется в результате обработки в режиме с напряжением смещения на подложке, равным 40 V. Следовательно, этот режим плазменной обработки поверхности GaN в разряде BCl_3 является оптимальным с точки зрения эффективного удаления окисла, формирования донорных азотных вакансий и сохранения *cap*-слоя НЕМТ-структуры, как такового.

Заключение

Таким образом, нами был установлен режим обработки в BCl_3 -плазме, позволяющий заметно снизить сопротивление омических контактов на AlGaIn/GaN НЕМТ-структуре. Была продемонстрирована ключевая роль напряжения смещения на подложке или, другими словами, средней энергии ионов, бомбардирующих поверхность верхнего GaN *cap*-слоя структуры. Обработка поверхности структуры в BCl_3 -плазме в ICP-RIE-режиме с напряжением смещения на подложке, равным 40 V, позволяет уменьшить поверхностный потенциальный барьер за счет образования донорных вакансий азота и эффективно удалять поверхностный окисел, что в итоге приводит к уменьшению сопротивления омических контактов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки по Соглашению № 14.582.21.0010 от 14.10.2015 в рамках ФЦП ИР 2014–2020, уникальный идентификатор проекта RFMEFI58215X0013. Исследования проведены с использованием оборудования ресурсного центра Научного парка СПбГУ „Физические методы исследования поверхности“.

Список литературы

- [1] Pearton S.J., Zolper J.C., Shul R.J., Ren F. // J. Appl. Phys. 1999. Vol. 86. P. 1.
- [2] Khan M.A., Bhattarai A.R., Kuznia J.N., Olson D.T. // Appl. Phys. Lett. 1993. Vol. 63. P. 1214.

- [3] *Tilak V., Matocha K., Sandvik P.* // Phys. Stat. Sol. C. 2005. Vol. 2. N 7. P. 2555–2558.
- [4] *Mishra U.K., Shen L., Kazior T., Wu Y.E.* // Proc. IEEE. 2008. Vol. 96. P. 287.
- [5] *Khan M.A., Shur M.S., Chen Q.* // Appl. Phys. Lett. 1996. Vol. 68. P. 3022.
- [6] *Fay M.W.* et al. // J. Appl. Phys. 2004. Vol. 96. P. 965 588.
- [7] *Fujishima T., Joglekar S., Piedra D., Lee H.S., Zhang Yu., Uedono A., Palacios T.* // Appl. Phys. Lett. 2013. Vol. 103. N 083508. P. 1–3.
- [8] *Kobelev A.A., Barsukov Yu.V., Andrianov N.A., Smirnov A.S.* // J. Phys.: Conf. Series. 2015. Vol. 586. N 012013. P. 1–4.
- [9] *Shul R.J., McClellan G.B.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1996. Vol. 69. P. 8.
- [10] *Shul R.J., McClellan G.B.* et al. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1997. Vol. 15. P. 3.
- [11] *Buttari D.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol. 83. P. 4779.
- [12] *Wang L., Mohammed F.M., Adesida I.* // J. Appl. Phys. 2007. Vol. 101. N 013702. P. 1–10.
- [13] *Sun J., Rickert K.A., Redwing J.M., Ellis A.B., Himpel F.J., Kuech T.F.* // Appl. Phys. Lett. 2000. Vol. 76. N 4. P. 415–417.
- [14] *Logan R.A., Thurmond C.D.* // J. Electrochem. Soc. 1972. Vol. 119. P. 1727.
- [15] *Higashiwaki M., Chowdhury S., Swenson B.L., Mishra U.K.* // Appl. Phys. Lett. 2010. Vol. 97. P. 222 104.
- [16] *Deepak S., Mohammed F.M., Jeong-Oun B., Adesida I.* // J. Vac. Sci. Technol. B. 2005. Vol. 23. N 6. P. 2538.
- [17] *Blauer J., Farber M.* // J. Chem. Phys. 1963. Vol. 39. N 1. P. 158–160.