

Двухслойная диэлектрическая маска $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ для создания низкоомных омических контактов к $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ HEMT

© С.С. Арутюнян^{*+}, А.Ю. Павлов^{*}, В.Ю. Павлов^{*}, К.Н. Томаш^{*}, Ю.В. Федоров^{*}

^{*} Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук, 117105 Москва, Россия

⁺ Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук, 142432 Черноголовка, Россия

E-mail: spartakmain@gmail.com

(Получена 21 января 2016 г. Принята к печати 1 февраля 2016 г.)

Описана технология формирования двухслойной диэлектрической маски $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ и особенности ее использования в технологии невжигаемых эпитаксиально дороженых омических контактов для мощных HEMT на гетероструктурах $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$. Предложенная маска $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ позволяет производить эпитаксиальное доразращивание сильно легированных омических контактов методом нитридной молекулярно-лучевой эпитаксии и получать невжигаемые омические контакты с удельным сопротивлением 0.15–0.2 Ом·мм и с гладкой морфологией поверхности и края.

1. Введение

Требования к потребляемой мощности, ширине динамического диапазона и другим характеристикам современной сверхвысокочастотной электронной компонентной базы на нитриде галлия (GaIn), применяющейся в устройствах коммерческого, военного и специального назначения [1], постоянно возрастают [1–3]. Такая тенденция обусловлена многими факторами, варьирующимися от проблем с обеспечением необходимого теплового режима из-за уменьшения размеров компонентов схем усилителей и других приборов [4], до требований к энергопотреблению всей системы в целом [5].

Характеристики нитридных монолитных интегральных схем во многом зависят от свойств их активного элемента — транзистора. Одним из важнейших показателей, влияющих на его работу, является контактное сопротивление R_C стока и истока, уменьшение которого является одной из наиболее актуальных задач нитридной микроэлектроники [6].

Как показывает анализ литературы последних лет, наименьшее R_C достигается при использовании технологии невжигаемых эпитаксиально доразращиваемых контактов [2,3]. В отличие от технологии вжигаемых контактов, где для формирования контактных областей на подложке чаще всего используется фоторезистивная маска, в технологии невжигаемых контактов такая маска не применима. Это объясняется тем, что технологический процесс эпитаксиального роста нитрида галлия проводится при температурах подложки 700–850°C. Такие высокие температуры приводят к задубливанию фоторезиста, что делает его дальнейшее удаление крайне затруднительным. По этой причине наиболее часто в качестве маски в технологии невжигаемых эпитаксиальных омических контактов используются однослойные диэлектрические пленки SiO_2 [7] и Si_3N_4 [8]. Данные маски обладают недостатками — они не могут обес-

печить стабильность энергетического профиля поверхности полупроводниковой подложки и селективность эпитаксиального роста GaIn , т.е. роста полупроводника исключительно в литографических окнах, без образования сплошного слоя на поверхности маски, который существенно усложнит проведение последующих технологических операций.

Цель данной работы — создание двухслойной маски $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$, позволяющей селективно формировать невжигаемые омические контакты к гетероструктурам $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ без влияния на электрофизические параметры гетероструктуры.

2. Формирование подконтактных масок Si_3N_4 , SiO_2 и $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$

Формирование невжигаемых контактов реализовывается в несколько этапов (см. рис. 1).

На первом этапе на поверхность гетероструктуры осаждается слой диэлектрика, на котором формируется фотолитографическая маска. Далее диэлектрик и поверхность гетероструктуры вытравливаются плазмохимическими методами на глубину двумерного электронного газа (2DEG). После этого в вытравленных окнах доразращивают сильно легированный нитрид галлия, на который напыляются металлические слои.

В данной работе были исследованы особенности использования в качестве подконтактных масок диэлектрической пленки Si_3N_4 , диэлектрической пленки SiO_2 и двухслойной системы диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$.

Осаждение диэлектриков проводилось плазмохимическим методом на установке Plasmalab System 100 фирмы Oxford с источником индуктивно связанной плазмы. Si_3N_4 осаждался из смеси газов N_2 и SiH_4 при температуре 250°C, а SiO_2 осаждался из смеси газов N_2O и SiH_4 при температуре 300°C.

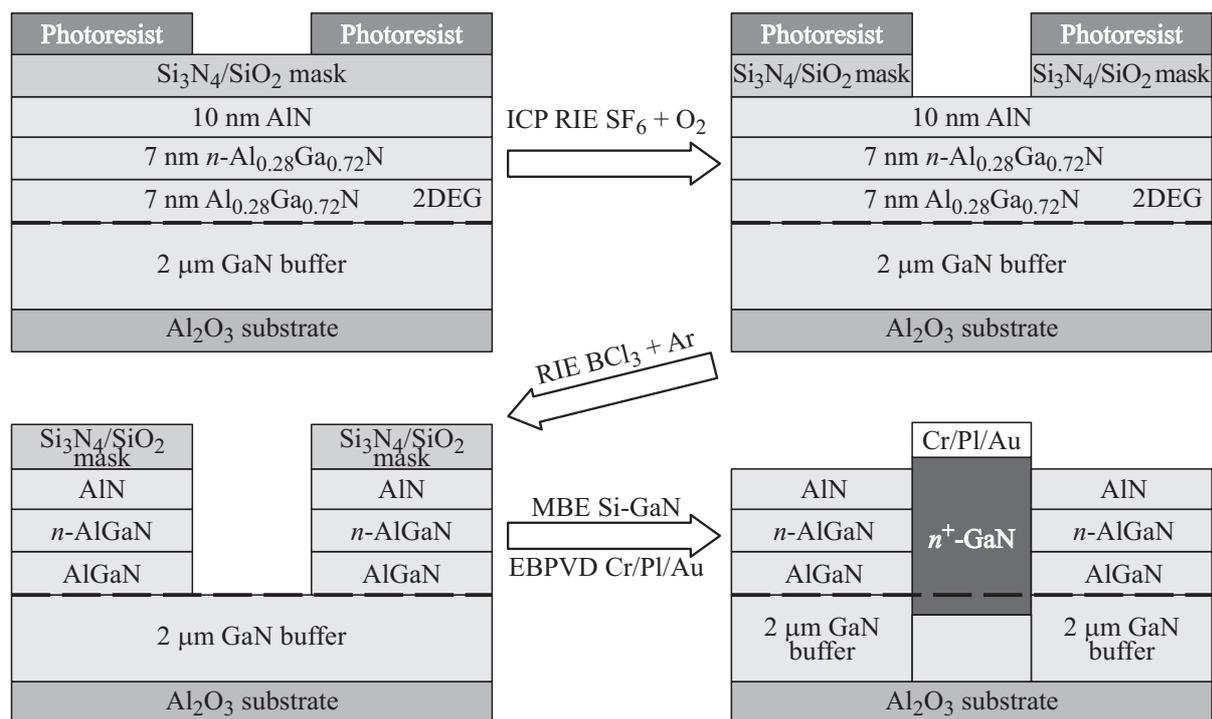


Рис. 1. Формирования эпитаксиальных нежгасимых доращиваемых омических контактов к гетероструктуре AlGaIn/GaN.

Далее фотолитографическими методами формировались „окна“ под контакты в диэлектрике, для чего на его поверхность наносилась резистивная маска, скорость травления которой ниже скорости травления диэлектрика. Реактивное ионное травление в индуктивно-связанной плазме (ICP RIE) было осуществлено в смеси SF_6 и O_2 на установке SI-500 фирмы Sentech. Данный метод обеспечивает высокую скорость и равномерность травления за счет высокой концентрации электронов и ионов.

После вытравливания окон в маскирующем диэлектрике и снятия фоторезистивной маски проводилось плазмохимическое травление барьерных слоев AlN/AlGaIn и AlN на глубину залегания двумерного электронного газа через сформированную диэлектрическую маску. Процесс проводился с использованием смеси BCl_3 и Ag на той же установке.

После того как поверхность пластины в окнах вытравлена, подложка готова к доращиванию омических контактов. На гетероструктуру с сформированной диэлектрической маской для омических контактов методом аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) осаждался легированный кремнием нитрид галлия со степенью легирования $5.1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. После осаждения сильно легированного GaIn диэлектрическая маска была удалена в растворе буферного травителя ($\text{HF}:\text{NH}_4\text{F}:\text{H}_2\text{O} = 1:3:7$).

Завершающей операцией в формировании контактов являлась металлизация. На сформированные сильно легированные области GaIn методом электронно-лучевого

испарения (EBPVD) осаждалась композиция металлов Cr/Pl/Au.

3. Особенности использования масок Si_3N_4 , SiO_2 и $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$

Оптимизация процесса МЛЭ включала в себя варьирование температуры подложки в пределах $700\text{--}850^\circ\text{C}$, что потребовало изготовления серии образцов с каждой из трех выбранных масок. Для всех масок было установлено, что кинетические процессы на их поверхности существенно меняются в диапазоне температур подложки $700\text{--}780^\circ\text{C}$ (см. рис. 2).

При температуре осаждения 700°C нитрид галлия осаждался по всей поверхности подложки сплошным слоем, как это видно на изображении, полученном с помощью сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) (см. рис. 2, a). Это существенно усложняло удаление диэлектрических масок и негативно влияло на сопротивление получаемых омических контактов.

Повышение температуры подложки до 780°C и выше приводило к миграции осаждаемого нитрида по поверхности маски и его скоплению в литографических окнах (см. рис. 2, b), что подтверждалось толщиной нитрида в них — она была на 80% больше, чем в случае с той же длительностью МЛЭ, но более низкой температурой.

Таким образом, при температурах подложки 780°C и выше рассматриваемые диэлектрические маски Si_3N_4 и SiO_2 обеспечивают селективный рост омических кон-

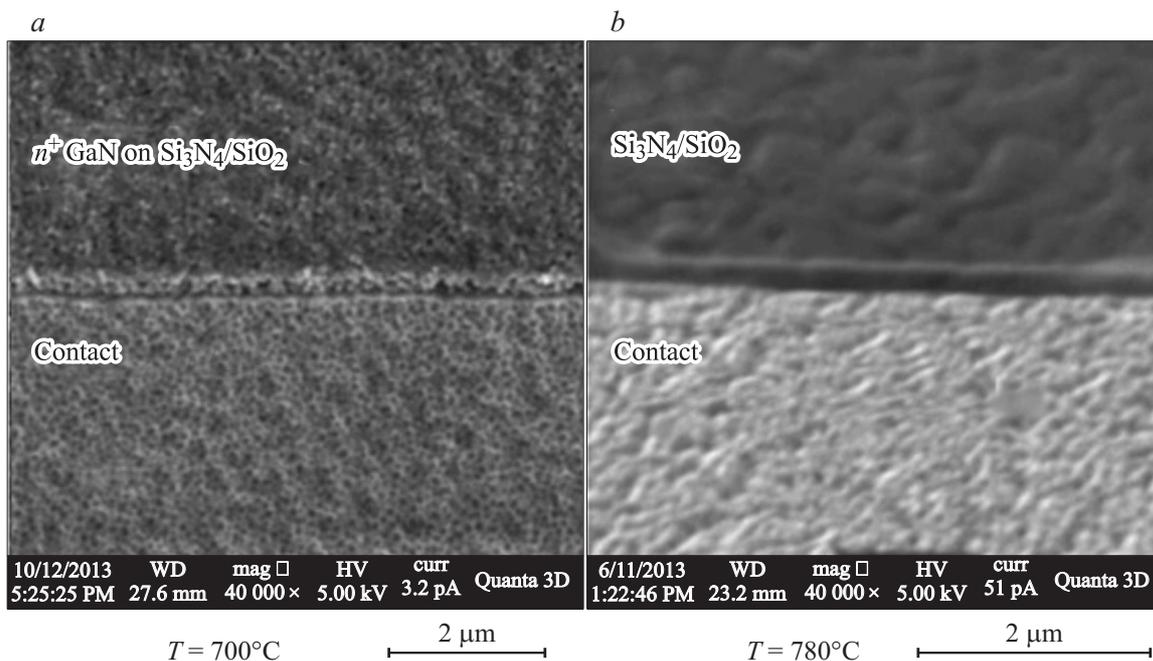


Рис. 2. СТМ-изображение поверхности гетероструктуры, покрытой сплошным слоем GaN после МЛЭ при 700°C (a) и СТМ-изображение покрытого GaN подконтактного окна в маске, не покрытой нитридом, после проведения МЛЭ при температуре 780°C (b).

тактов. При данных температурах маски Si₃N₄ и SiO₂ проявляют различные свойства.

В процессе МЭЛ на маске Si₃N₄ происходит рост кристаллов галлия и частичное зарастание ее узких участков (см. рис. 3). При этом данная маска никак не повлияла на электрофизические параметры подложки — токи насыщения вольт-амперных характеристик (ВАХ) не изменились.

При использовании маски SiO₂ наблюдается полная селективность роста n⁺-GaN (см. рис. 4), т. е. образова-

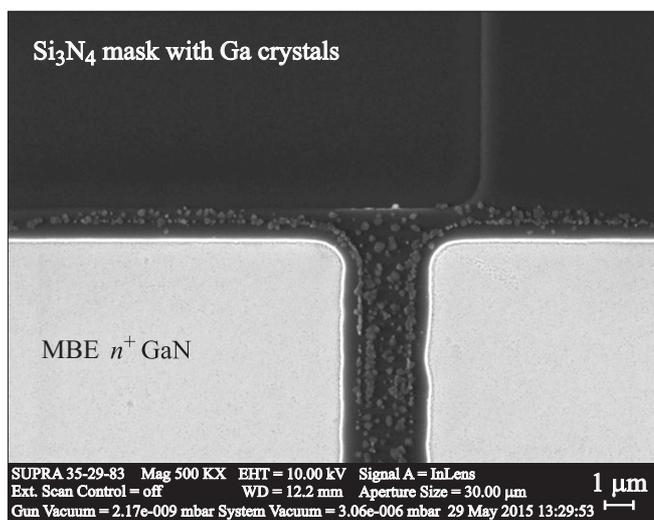


Рис. 3. Образовавшиеся на поверхности маски Si₃N₄ кристаллы галлия.

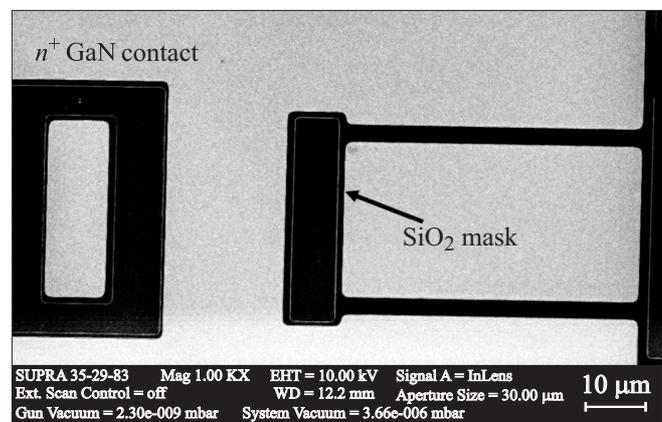


Рис. 4. СТМ-изображение не покрытой нитридом маски SiO₂ и контактной области, в которой происходил рост GaN после МЛЭ при температуре 780°C.

ния кристаллов галлия на поверхности не происходит, но ее использование при указанных температурах из-за содержания кислорода приводит к окислению барьерного слоя AlGa_{0.3}N и изменению электрофизических параметров гетероструктуры. Это сказывается на свойствах транзистора — токи насыщения уменьшаются на 9–10%, как это видно на вольт-амперных характеристиках (см. рис. 5), что приводит к снижению его мощности.

Таким образом, было установлено, что однослойные диэлектрические маски Si₃N₄ и SiO₂ имеют недостатки

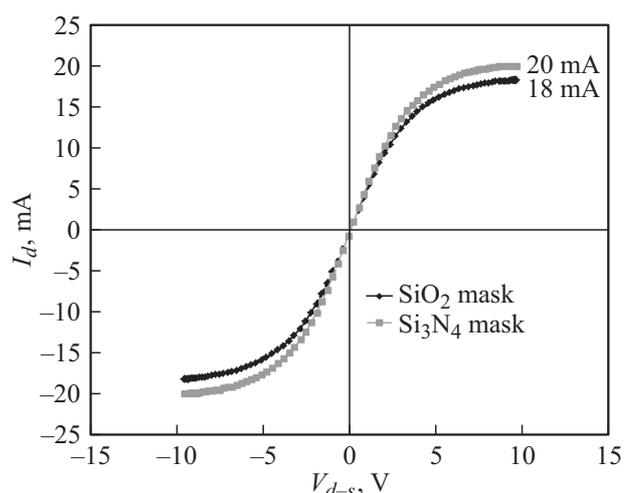


Рис. 5. Падение тока насыщения ВАХ эпитаксиального омического контакта при использовании маски SiO_2 .

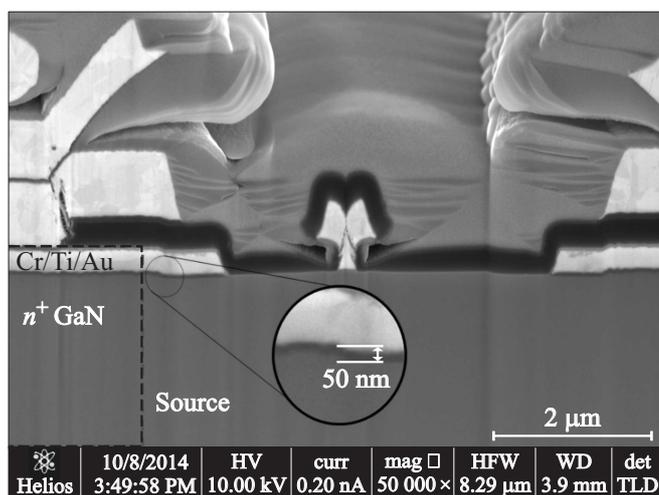


Рис. 6. РЭМ-изображение среза эпитаксиального омического контакта n^+ -GaN. На вставке изображен подъем поверхности эпитаксиально дорожечного n^+ -GaN по отношению к поверхности гетероструктуры.

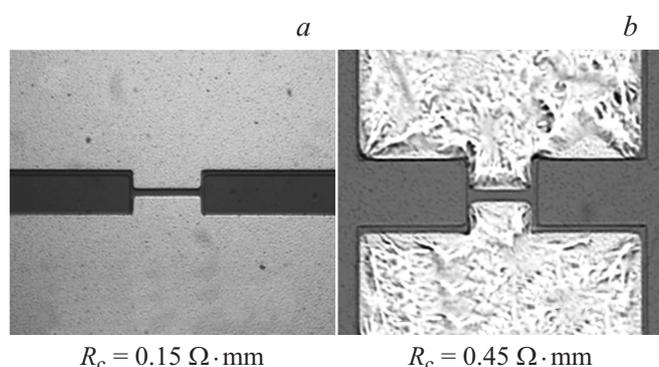


Рис. 7. Наблюдаются существенные различия морфологии невжигаемого дорожечного (a) и вжиганного (b) омических контактов с одинаковой композицией металлов.

для использования их как литографических масок при формировании эпитаксиальных омических контактов.

Избежать этих недостатков и объединить достоинства однослойных масок позволяет двухслойная диэлектрическая маска $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$, где Si_3N_4 осаждается на поверхность полупроводниковой подложки, а SiO_2 покрывает его. Такая маска не окисляет поверхность барьерного слоя гетероструктуры, и на ее поверхности не формируются кристаллы галлия, т.е. она сохраняет селективность роста нитрида галлия. Именно эта маска наиболее оптимальная для использования в технологии формирования невжигаемых омических контактов для НЕМТ на GaN.

На рис. 6 приведено изображение с растрового-электронного микроскопа (РЭМ) среза полученных с помощью двухслойной маски контактов. В выделенной области заметна разница в высоте между выращенным n^+ -GaN и поверхностью полупроводниковой структуры.

Для измерения контактного сопротивления R_C получаемых с использованием данной маски омических контактов на нитридной гетероструктуре использовался метод длинной линии. Величина измеренного сопротивления составила $0.15\text{--}0.2 \text{ Ом} \cdot \text{мм}$, что является результатом мирового уровня [9].

Изображение поверхности невжигаемых эпитаксиально дорожечных и вжигаемых омических контактов, полученное на оптическом микроскопе, показано на рис. 7. Среднеквадратичная шероховатость (rms) поверхности дорожечного контакта составляет $5\text{--}10 \text{ нм}$, в то время как для вожженного контакта rms значительно выше и составляет $60\text{--}120 \text{ нм}$. Это связано с тем, что дорожечные контакты не нуждаются в высокотемпературной термической обработке, т.е. вжигании, при котором часть напыленной композиции металлов расплавляется и изменяет геометрическую форму как поверхности контакта, так и его края.

4. Заключение

В данной работе проводился поиск оптимальной литографической маски для технологии формирования невжигаемых омических контактов с использованием аммиачной МЛЭ для создания НЕМТ на основе гетероструктуры AlGaIn/GaN. Было показано, что однослойные диэлектрические маски Si_3N_4 и SiO_2 имеют недостатки для использования в данной технологии, в то время как двухслойная маска $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ позволяет избежать их и селективно формировать n^+ -GaN омические контакты без изменения электрофизических свойств гетероструктуры. Получаемые с использованием данной технологии омические контакты имеют удельное контактное сопротивление $0.15\text{--}0.2 \text{ Ом} \cdot \text{мм}$, имеют хорошую воспроизводимость и технологичность.

Авторы выражают благодарность канд. физ.-мат. наук Р.А. Хабибуллину за участие в обсуждении результатов работы и ценные советы при написании публикации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение о предоставлении субсидии № 14.604.21.0136, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60414X0136).

Список литературы

- [1] В.Г. Мокеров, А.Л. Кузнецов, Ю.В. Федоров, Е.Н. Енюшкина, А.С. Бугасев, А.Ю. Павлов, Д.Л. Гнатюк, А.В. Зуев, Р.Р. Галиев, Е.Н. Овчаренко, Ю.Н. Свешников, А.Ф. Цацуньников, В.М. Устинов. ФТП, **43** (4), 561 (2008).
- [2] J. Huang, M. Li, C. Tang, K. Lau. Chinese Physics B, **23** (12), (2014).
- [3] A. Subramaniam, I.N. Geok, R. Kumud, M.M.K. Chandra, C.F. Siew, S.A. Kian, V. Salmuganathan, B.D. Surani, B. Thirumaleshwararacc, T. Sudhiranjan. Jpn. J. Appl. Phys., **54**, 04DF12 (2015).
- [4] И.М. Аболдуев, Н.Б. Гладышева, А.А. Дорофеев, Ю.В. Колковский, В.М. Миннебаев. Тез. докл. 10-й Всерос. конф. „Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы“, под ред. А.В. Сахарова, В.Г. Сидорова (СПб., Россия, СПбГПУ, 2015) с. 140.
- [5] М. Гольцова. Электроника: НТБ, **4**, 86 (2012).
- [6] S. Dasgupta, Nidhi, D.F. Brown, F. Wu, S. Keller, J.S. Speck, U.K. Mishra. Appl. Phys. Lett., **96**, 143 504 (2010).
- [7] J.G. Felbinger, M. Fagerlind, O. Axelsson, N. Rorsman, X. Gao, S. Guo, W.J. Schaff, L.F. Eastman. IEEE Electron Dev. Lett., **32** (7), 889 (2011).
- [8] Y. Yue, Z. Hu, J. Guo, B. Sensale-Rodriguez, G. Li, R. Wang, F. Faria, T. Fang, B. Song, X. Gao, S. Guo, T. Kosel, G. Sinder, P. Fay, J. Debdeep, H. Xing. IEEE Electron Dev. Lett., **33** (7), 988 (2012).
- [9] Nidhi, D.F. Brown, S. Keller, U.K. Mishra. Jpn. J. Appl. Phys., **49**, 021 005 (2010).

Редактор А.Н. Смирнов

Two-layer Si₃N₄/SiO₂ dielectric mask for low-resistance ohmic contacts to AlGaIn/GaN HEMT

S.S. Arutyunyan^{*+}, K.N. Tomosh^{*}, A.U. Pavlov^{*},
B.U. Pavlov^{*}, U.V. Fedorov^{*}

^{*} Institute of Ultrahigh Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Sciences, 117105 Moscow, Russia

⁺ Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials of Russian Academy of Sciences, 142432 Chernogolovka, Russia

Abstract In this paper the fabrication of the two-layer dielectric mask Si₃N₄/SiO₂ and features of its application in technology in non-alloyed epitaxially grown ohmic contacts for power HEMT heterostructure AlGaIn/GaN technology is described. The proposed mask Si₃N₄/SiO₂ allows selective epitaxial growth of heavily doped GaN for non-alloyed ohmic contacts with resistivity 0.15–0.2 Ohm·mm and extremely smooth surface and edges morphology.