

## Сплавные омические контакты на основе Si/Al к нитридным гетеросистемам AlGaIn/GaN

© Д.Н. Слаповский<sup>1,2</sup>, А.Ю. Павлов<sup>2</sup>, В.Ю. Павлов<sup>2</sup>, А.В. Клековкин<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук, 142432 Черноголовка, Россия

<sup>2</sup> Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук, 117105 Москва, Россия

<sup>3</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, 119991 Москва, Россия

E-mail: dslapovskiy@gmail.com

(Получена 28 сентября 2016 г. Принята к печати 7 октября 2016 г.)

Впервые в России исследована сплавная контактная композиция Si/Al/Ti/Au для формирования омических контактов к гетероструктурам AlGaIn/GaN с использованием температурного отжига. Проведено сравнение полученных результатов с традиционными омическими контактами Ti/Al/Ni/Au. Использование исследуемой композиции позволило снизить температуру отжига до 675–700°C, что привело к улучшению морфологии сплавных омических контактов по сравнению с традиционными. Были получены зависимости значения контактного сопротивления с использованием композиции на основе Si/Al к гетероструктуре AlGaIn/GaN от температуры и длительности температурного отжига. Показано, что в диапазоне температур 700–750°C качественного изменения сопротивления не происходит при длительности отжига несколько минут. В диапазоне температур 675–700°C идет асимптотическое уменьшение удельного контактного сопротивления при увеличении длительности отжига. Минимальное значение удельного контактного сопротивления составило 0.41 Ом·мм.

DOI: 10.21883/FTP.2017.04.44336.8418

### 1. Введение

Большая ширина запрещенной зоны, высокая слоевая концентрация электронов ( $n_e > 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ), большие напряжения пробоя и высокая дрейфовая скорость насыщения электронов делают гетеросистему AlGaIn/GaN чрезвычайно перспективной для мощных сверхвысокочастотных (СВЧ) приборов [1]. Активным элементом современной СВЧ монолитной интегральной схемы является НЕМТ полевой транзистор с двумерным электронным газом (2DEG), и для повышения производительности его работы необходимо предъявлять особые требования к омическим контактам, входящим в его состав. Омические контакты истока и стока должны обладать минимальным контактным сопротивлением, высокой термостабильностью и гладкой морфологией [2–6]. Операция формирования омических контактов также должна обладать высокой степенью воспроизводимости, что в свою очередь предъявляет определенные требования к режиму термообработки. Работы по исследованию контакта металл–полупроводник для гетеросистем AlGaIn/GaN являются актуальными как в зарубежной, так и в российской практике на сегодняшний день.

Как известно, для образования омического контакта необходимо либо отсутствие потенциального барьера на границе металл–полупроводник, либо наличие низкого барьера, легко преодолеваемого носителями (протекания тока через контакт за счет термоэлектронной эмиссии), или же барьер должен быть туннельно-прозрачен для электронов (полевая эмиссия). Возможна также

комбинация двух последних механизмов (термополевая эмиссия) [7]. Удовлетворение вышеописанных условий создания омических контактов достигается путем определенного подбора состава омического контакта, а также различными путями изменения химического состава приповерхностной области полупроводника.

В связи с тем что высота барьера Шоттки зависит от работы выхода контактных металлов, омический контакт может быть сформирован с использованием металлов, имеющих работу выхода электронов меньше сродства к электрону полупроводника [7]. В качестве первого (контактного) слоя в системе металлизации омического контакта чаще всего используется слой Ti с работой выхода 3.74 эВ [3], обладающий отличными адгезионными свойствами [4,5]. Также в качестве первого слоя композиции омического контакта в некоторых работах использовались слои: Hf [6,8], Mo [9], V [10], Pd [11], Nd [12]. Однако уровень Ферми на поверхности нитридов почти не закреплен, и обычные химически стабильные металлы имеют работу выхода, большую, чем сродство к электрону для данных полупроводников, и сопротивление омического контакта к нитридам существенно увеличивается с ростом работы выхода электронов из контактирующего металла, а также с ростом ширины запрещенной зоны гетероструктуры [7].

Итак, для формирования омического контакта к нитриду галлия необходимо наличие низкого потенциального барьера на границе металл–полупроводник или же создание высоколегированного приповерхностного слоя полупроводника [7]. В случае со сплавными омическими

контактами к нитридным гетероструктурам AlGaN/GaN, высоколегированная область создается за счет обеднения приповерхностного слоя полупроводника атомами азота, создавая, таким образом, азотные вакансии [3–5]. Предварительная ионная бомбардировка поверхности полупроводника (RIE) создает дефектную область, выступающей в качестве высоколегированной [4]. Также легирующая примесь может быть добавлена в состав самой металлизации омического контакта [2,13–15].

Классические системы металлизации на основе Ti/Al являются одними из самых широко используемых в сплавных омических контактах к нитридным гетероструктурам AlGaN/GaN. Образование соединений TiN и AlN приводит к вышеописанному созданию азотных вакансий в полупроводнике у границы контакта, однако требует при этом высоких температур термообработки (более 800°C) [3–5]. Более того, соединение TiN обладает малой работой выхода [3,4], что, как уже было отмечено выше, приводит к уменьшению значения сопротивления омического контакта. Однако склонность к окислению Ti и Al требует использования антикоррозионного слоя Au. Более того, соединения Al с Au имеют тенденцию образовываться на границе контакта, таким образом увеличивая значение контактного сопротивления и ухудшая морфологию после отжига [3]. В связи с этим появляется необходимость использования барьерного слоя, препятствующего диффузии Al в направлении верхнего слоя Au и легко диффундирующего Au в сторону полупроводника. Для этой роли подходят такие металлы, как Ni, Ti, Pd, Pt, Mo, Ta, Re, Ir, Nb, Cr и т.д. [16–18]. Несколькими исследовательскими группами было продемонстрировано, что барьерные слои этих металлов при высоких температурах разбиваются на отдельные небольшие фракции (рвутся), создавая, таким образом, щели для диффузии металлов сквозь барьерный слой [3].

Таким образом, в целях улучшения морфологии была поставлена задача уменьшить температуру термообработки омических контактов до 675–725°C, сохранив при этом низкое значение сопротивления контактов. Для формирования омических контактов с низким значением удельного контактного сопротивления в традиционной системе металлизации омических контактов Ti/Al/Ni/Au проводят температурный отжиг при температурах выше 800°C, при данных значениях температуры образуется необходимая толщина TiN [17]. Для уменьшения температуры отжига и значения контактного сопротивления в эту систему металлизации вводят перед первым слоем Ti тонкий слой Si, играющий роль легирующей примеси [13]. Наличие контактного слоя Si в композиции на основе Si/Ti/Al при температурах отжига ниже 700°C приводит к образованию соединений TiSi<sub>x</sub> без образования TiN [6]. Таким образом, можно исключить слой Ti, поскольку поменялась его роль — взамен образования азотных вакансий идет уменьшение концентрации примесных атомов Si в композиции. Так как низкоомные соединения Ti с Al обладают хорошей

термостабильностью, в качестве барьерного слоя был выбран Ti.

Цель данной работы — оценить морфологию, значение удельного контактного сопротивления и воспроизводимость омических контактов на основе Si/Al к гетеросистеме AlGaN/GaN в сравнении с традиционными омическими контактами на основе Ti/Al.

## 2. Эксперимент

Для оценки влияния состава и термической обработки на формируемые сплавные омические контакты к полупроводнику была взята гетероструктура AlGaN/GaN с толщиной барьерного слоя AlGaN 14 нм, выращенная методом химического осаждения из газовой фазы с использованием металлоорганических соединений на подложке сапфира, подвижность основных носителей заряда и концентрация в гетероструктуре 1645 см<sup>2</sup>/В·с и 1.28 · 10<sup>13</sup> см<sup>-2</sup> при комнатной температуре соответственно. Перед формированием сплавных омических контактов на пластине с гетероструктурой была сформирована мезаизоляция методом плазмохимического травления полупроводника через фоторезистивную маску в смеси газов BCl<sub>3</sub>/Ar на глубину 80 нм.

После травления мезаизоляции на гетероструктуру AlGaN/GaN на разные участки пластины через двухслойную систему фоторезистов („lift-off“) наносилась контактная композиция сплавной металлизации омических контактов термическим (резистивным) методом в вакууме. Затем проводилась термическая обработка данной металлизации в среде азота. Таким образом, на одной пластине последовательно формировались сплавные омические контакты разного состава.

Первоначально на участок пластины была нанесена контактная композиция традиционных сплавных омических контактов Ti (27 нм)—Al (137 нм)—Ni (80 нм)—Au (60 нм), затем была проведена термическая обработка металлизации в среде азота при температуре 820°C в течение 30 с. Традиционная композиция сплавных омических контактов была сформирована для сравнения следующих композиций с полученным рельефом и контактным сопротивлением на данной гетероструктуре. На оставшихся участках пластины формировались сплавные омические контакты с композицией на основе Si/Al. Все слои композиции, кроме кремния, имели одну толщину: Si—Al (50 нм)—Ti (25 нм)—Au (50 нм), изменялась только толщина кремния и режимы термической обработки. Так как контактная металлизация наносилась термическим (резистивным) методом, имеющим большие скорости осаждения в вакууме, тонкие пленки кремния, менее 5–7.5 нм, было сложно воспроизвести. В связи с этим в исследовании композиций сплавных омических контактов были использованы толщины кремния больше 5 нм. Оценивались два варианта сплавных композиций в зависимости от термической обработки:

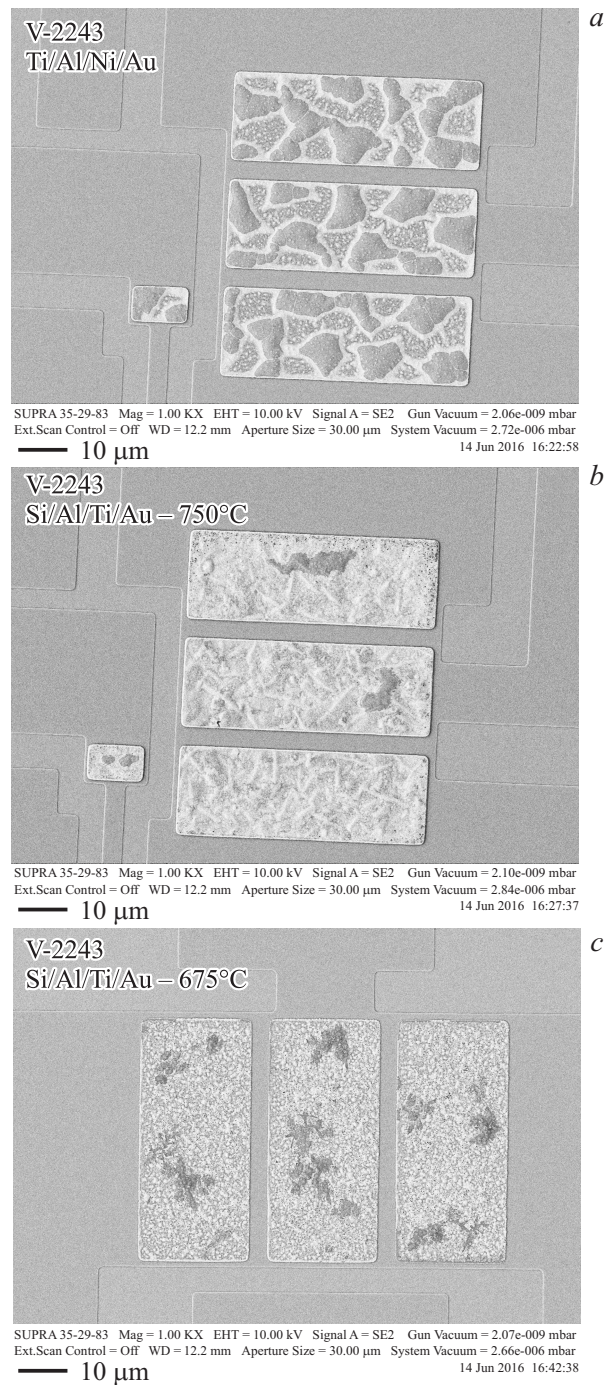
Si (7.5 нм)–Al (50 нм)–Ti (25 нм)–Au (50 нм), а также Si (12.5 нм)–Al (50 нм)–Ti (25 нм)–Au (50 нм).

При замене контактного слоя Ti на Si планировалось снизить температуру обработки контактной композиции в азоте до рабочего интервала температур 650–725°C. После нанесения контактной металлизации на основе Si/Al на гетероструктуру они подвергались термической обработке в среде азота в установке быстрого термического отжига (БТО). Исследовалась зависимость контактного сопротивления сплавной композиции от длительности температурного отжига и от величины температуры отжига для двух вариантов композиции, результаты которых сравнивались с полученными значениями для традиционного состава композиции. Для оценки значения сопротивления омических контактов использовался метод длинной линии (LTLM — Linear Transmission Line Method), представляющий собой набор контактных площадок, расположенные друг от друга на расстоянии, отличающемся в 2 раза.

### 3. Результаты

После формирования сплавных омических контактов на пластине с гетероструктурой были сняты фотографии морфологии поверхности сплавной композиции после термической обработки на растровом электронном микроскопе (РЭМ). Высокие температуры обработки сплавных композиций, выше температуры плавления алюминия (660°C), приводят к развитому рельефу поверхности сплавной композиции [18]. Очевидно, что наиболее развитым рельефом после термической обработки обладают традиционные сплавные омические контакты (рис. 1, *a*), сплавление которых происходит при 820°C. Для сравнения морфологии сплавных омических контактов на основе Si/Al были выбраны два режима термической обработки: при минимальной температуре обработки (675°C) и максимальной температуре обработки (750°C). Омические контакты, сплавленные при температуре 750°C, имеют менее однородный рельеф (рис. 1, *b*) по сравнению с вариантом сплавления при температуре 675°C (рис. 1, *c*). Но в любом случае омические контакты на основе Si/Al за счет меньшей температуры сплавления имеют более гладкий рельеф по сравнению с традиционной сплавной композицией.

Методом LTLM было оценено значение сопротивления омических контактов, сформированных с использованием традиционной композиции Ti/Al/Ni/Au на гетероструктуре AlGaIn/GaN, значение сопротивления составило 0.6 Ом·мм. Также оценивалось значение сопротивления омических контактов, сформированных на основе Si/Al. Наименьшее значение сопротивления было получено для состава Si (7.5 нм)–Al (50 нм)–Ti (25 нм)–Au (50 нм) при температуре 675°C и составило 0.41 Ом·мм. Сравнение наклона вольт-амперных характеристик (ВАХ) лучшего варианта омических контактов на основе Si/Al с традиционной композицией



**Рис. 1.** РЭМ изображения поверхности сплавных композиций омических контактов после термической обработки: *a* — Ti/Al/Ni/Au при 820°C, *b* — Si/Al/Ti/Au при 750°C и *c* — Si/Al/Ti/Au при 675°C.

на основе Ti/Al для одного топологического элемента представлено на рис. 2. Из угла наклона можно установить, что наименьшее значение сопротивления омических контактов к одной и той же гетероструктуре обеспечивает сплавная композиция на основе Si/Al.

Таким образом, показано, что замена в сплавной композиции контактного слоя Ti на Si позволяет за

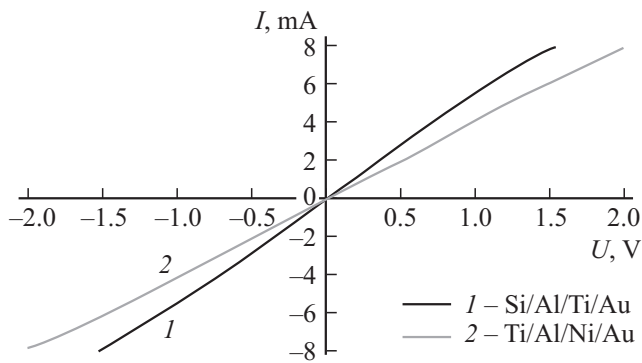


Рис. 2. ВАХ сплавных композиций Ti/Al/Ni/Au и Si/Al/Ti/Au.

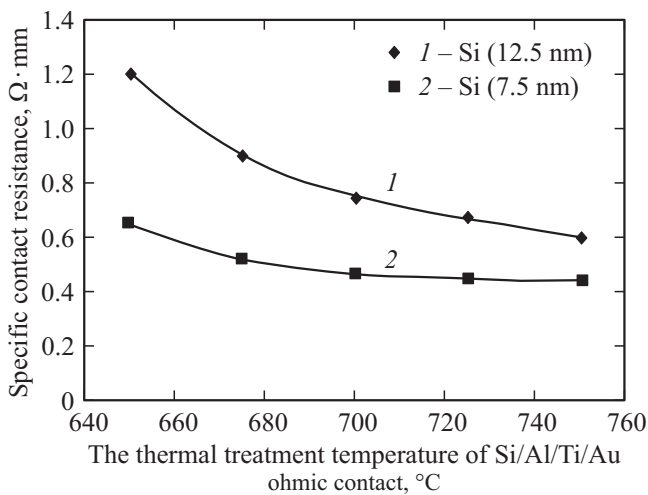


Рис. 3. Зависимость удельного контактного сопротивления омических контактов с составом Si/Al/Ti/Au от температуры термической обработки.

счет уменьшения температуры сплавления улучшить морфологию и получить значение контактного сопротивления не хуже значений, получаемых для традиционной сплавной композиции.

Также было оценено значение сопротивления омических контактов на основе Si/Al в зависимости от длительности термической обработки при фиксированной температуре и в зависимости от роста температуры сплавления композиции от 650 до 750°C.

Каждая из двух композиций с разным содержанием кремния на основе Si/Al прошла термическую обработку при температурах 650, 675, 700°C в течение 10 мин и при температурах 725, 750°C в течение 5 мин с последующим измерением значения удельного контактного сопротивления (рис. 3). Увеличение температуры термообработки приводит к получению меньших значений удельного контактного сопротивления, данная зависимость наиболее заметна для композиции с толщиной кремния 12.5 нм, для композиции с толщиной кремния 7.5 нм зависимость слабо выраженная и после 700°C практически не меняется. Таким образом, мы наблюдаем

диффузию примесных атомов кремния в нитрид галлия, образующих легированный контактный слой. Как известно, температура ускоряет процесс диффузии, при этом диффузия может носить вакансионный механизм (вакансии азота образуются из-за образования AlN) либо межузельный механизм. Повышая температуру, мы ускоряем процесс формирования сильно легированного контактного слоя, поэтому получаемое значение контактного сопротивления меньше при высоких температурах. Но помимо диффузии кремния, идет процесс образования силицида алюминия — процесс, связанный с формированием омических контактов в кремниевой технологии. Следовательно, кремния в композиции должно быть достаточно как для процесса диффузии, так и для процесса образования силицида алюминия. При толщине кремния в композиции 12.5 нм мы наблюдали значение удельного контактного сопротивления, большее, чем для толщины 7.5 нм при одних и тех же температурах термообработки, возможно, из-за диффузии алюминия с образованием AlN через кремний, которая наиболее вероятна при меньших толщинах нижележащего слоя. При толщине кремния 7.5 нм температура сплавления выше 700°C, заметного уменьшения значения удельного контактного сопротивления не наблюдается, что может свидетельствовать об образовании необходимой толщины сильно легированного контактного слоя для омического контакта, что в свою очередь говорит о вакансионном механизме диффузии, либо о полном растворении слоя кремния в контактной композиции.

Для композиции с толщиной кремния 12.5 нм была получена зависимость удельного контактного сопротивления от длительности термической обработки. Образец с нанесенной контактной композицией Si (12.5 нм)–Al (50 нм)–Ni (25 нм)–Au (50 нм) выдерживался при температуре 675°C в течение 60 мин, при этом каждые 10 мин образец вынимался из установки

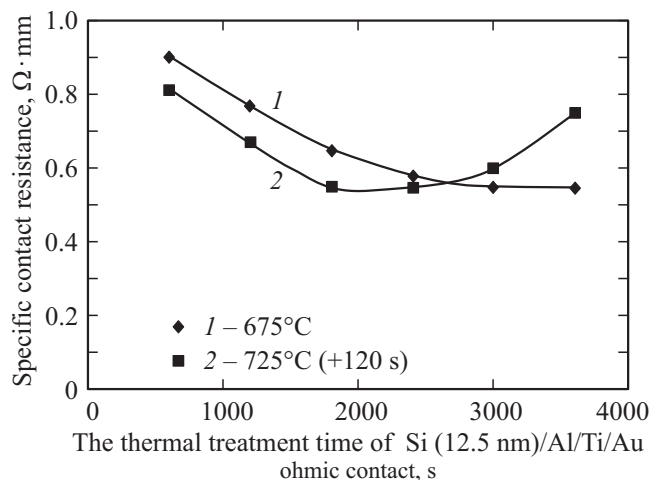


Рис. 4. Зависимость удельного контактного сопротивления омических контактов с составом Si (12.5 нм)/Al/Ti/Au от времени термической обработки.

БТО для измерения значения удельного контактного сопротивления, полученная зависимость представлена на рис. 4. В результате последовательный набор времен сплавления при температуре 675°C с промежуточными измерениями позволил уменьшить значение удельного контактного сопротивления с 0.9 до 0.55 Ом · мм. Данное изменение, как и увеличение температуры, можно связать с процессом диффузии примеси в полупроводник, приводящей к образованию высоко легированного контактного слоя. В процессе экспериментов было замечено, что предварительно сплавленная композиция при дополнительном сплавлении при большей температуре позволяет получать меньшие значения удельного контактного сопротивления даже при небольшом времени отжига. В связи с этим была дополнительно получена зависимость удельного контактного сопротивления от двухстадийного набора времени отжига: 10 мин отжиг при температуре 675°C и следом 2 мин отжига при температуре 725°C (рис. 4), измерение контактного сопротивления и повторение двухстадийного отжига для получения 6 точек. Минимальное значение удельного сопротивления достигнуто на третьей стадии такого отжига (0.55 Ом · мм). Последующие стадии отжига привели к ухудшению морфологии и увеличению значения удельного контактного сопротивления. Это произошло из-за диффузии золота в полупроводник. Такая проблема существует и в традиционной сплавной композиции, для ее устранения вводят тугоплавкие барьерные слои (Mo, V и т.п.), но они все равно при нагреве выше температур плавления алюминия рвутся. Для решения этой проблемы стараются снизить температуру отжига, либо заменяют химически неактивный верхний слой композиции золота на медь [2,3].

Как показали эксперименты с разной толщиной кремния в композиции, температурой и временем термической обработки, получение необходимого значения сопротивления омического контакта достигается путем увеличения длительности термической обработки, либо увеличения значения температуры при фиксированной толщине кремния в композиции. Последовательная термическая обработка композиции омического контакта с увеличением температуры показала уменьшение значения сопротивления омического контакта при неизменном рельефе поверхности. Для омических контактов с толщиной кремния 7.5 нм наблюдались незначительные изменения значений удельного контактного сопротивления в широком диапазоне температур отжига, что повышает технологичность и воспроизводимость процесса термообработки омических контактов по сравнению с композициями на основе Ti/Al.

#### 4. Заключение

В данной работе были получены зависимости морфологии и удельного контактного сопротивления композиции омических контактов (Si/Al/Ti/Au) от температуры

и времени термообработки в среде азота при толщинах кремния в композиции 12.5 и 7.5 нм. Морфология и значения контактного сопротивления сравнивались с результатами для классической композиции (Ti/Al/Ni/Au), полученными на той же гетероструктуре. Улучшение морфологии получено за счет уменьшения температуры термической обработки омических контактов при использовании контактного слоя Si вместо Ti. Создание высоко легированного контактного слоя достигнуто не за счет создания азотных вакансий, как в классической композиции на основе Ti/Al, а за счет добавления в состав омического контакта легирующего материала (Si). При фиксированной температуре в интервале 650–700°C при увеличении времени отжига сопротивление постепенно уменьшалось до уровня 0.41 Ом · мм для композиции с толщиной Si 7.5 нм. Уменьшение толщины кремния позволяло достичь лучших значений при меньшей длительности обработки. Увеличение температуры до 750°C позволило получить минимальное удельное контактное сопротивление за меньший интервал времени, но при увеличении длительности обработки ухудшалась морфология и начинало расти значение удельного контактного сопротивления.

Использование сплавной композиции на основе Si/Al позволило улучшить морфологию омических контактов, получив значения удельного контактного сопротивления, не уступающие значениям, получаемым с использованием композиций на основе Ti/Al.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение о предоставлении субсидии № 14.607.21.0011, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60714X0011).

#### Список литературы

- [1] В.Г. Мокеров, А.Л. Кузнецов, Ю.В. Федоров, Е.Н. Енюшкина, А.С. Бугаев, А.Ю. Павлов, Д.Л. Гнатюк, А.В. Зуев, Р.Р. Галиев, Е.Н. Овчаренко, Ю.Н. Свешников, А.Ф. Цацульников, В.М. Устинов. *ФТП*, **43** (4), 561 (2009).
- [2] S. Yoon, J. Bang, H. Lee, J. Oh. *Microelectron. Engin.*, **151**, 60 (2016).
- [3] S. Yoon, Y. Song, S.M. Lee, H. Lee, J. Oh. *Semicond. Sci. Technol.*, **31**, 055002 (2016).
- [4] S. Ruvimov, Z. Liliental-Weber, J. Washburn, K.J. Duxstad, E.E. Haller, Z.F. Fan, S.N. Mohammad, W. Kim, A.E. Botchkarev, H. Morkoc. *Appl. Phys. Lett.*, **69** (11), 1556 (1996).
- [5] A. Motayed, R. Bathe, M.C. Wood, O.S. Diouf, R.D. Vispute, S.N. Mohammad. *J. Appl. Phys.*, **93** (2), 1087 (2003).
- [6] Y. Liu, S.P. Singh, L.M. Kyaw, M.K. Bera, Y.J. Ngoo, H.R. Tan, S. Tripathy, G.Q. Lo, E.F. Chor. *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, **4** (2), 30 (2015).
- [7] Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг. *ФТП*, **41** (11), 1281 (2007).
- [8] Y. Liu, M.K. Bera, L.M. Kyaw, G.Q. Lo, E.F. Chor. *Int. J. Electron. Comput. Inf. Technol.*, **6** (9), 957 (2012).
- [9] D. Selvanathan, F.M. Mohammed, A. Tesfayesus, I. Adesida. *J. Vac. Sci. Technol.*, **22** (5), 2409 (2004).

- [10] A. Schmid, Ch. Schroeter, R. Otto, M. Schuster, V. Klemm, D. Rafaja, J. Heitmann. *Appl. Phys. Lett.*, **106**, 053509 (2015).
- [11] A.T. Ping, M.A. Khan, I. Adesida. *J. Electron. Mater.*, **25**, 819 (1996).
- [12] C.T. Lee, M.Y. Yeh, Y.T. Lyu. *J. Electron. Mater.*, **26**, 262 (1997).
- [13] G. Guodong, D. Shaobo, L. Yuanjie, H. Tingting, X. Peng, Y. Jiayun, F. Zhihong. *J. Semicond.*, **34** (11), 114004 (2013).
- [14] F.M. Mohammed, L. Wang, I. Adesida. *J. Appl. Phys.*, **88**, 212107 (2006).
- [15] V. Desmaris, J. Shiu, Ch. Lu, N. Rorsman, H. Zirath, E. Chang. *J. Appl. Phys.*, **100**, 034904 (2006).
- [16] F.M. Mohammed, L. Wang, H.J. Koo, I. Adesida. *J. Appl. Phys.*, **101**, 033708 (2007).
- [17] F.M. Mohammed, L. Wang, I. Adesida. *J. Appl. Phys.*, **101**, 013702 (2007).
- [18] W. Macherzynski, A. Stafniak, A. Szyszka, J. Gryglewicz, B. Paszkiewicz, R. Paszkiewicz, M. Tlaczala. *Optica Applicata*, **39** (4), 673 (2007).

*Редактор Г.А. Оганесян*

## **Alloyed Si/Al-based ohmic contacts to nitride AlGaN/GaN heterostructures**

*D.N. Slapovskiy<sup>1,2</sup>, A.Yu. Pavlov<sup>2</sup>, V.Yu. Pavlov<sup>2</sup>, A.V. Klekovkin<sup>2,3</sup>*

<sup>1</sup> Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials of Russian Academy of Sciences, 142432 Chernogolovka, Russia

<sup>2</sup> Institute of Ultrahigh Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Sciences, 117105 Moscow, Russia

<sup>3</sup> Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, 119991 Moscow, Russia

**Abstract** In this paper the Si/Al/Ti/Au composition of alloyed ohmic contacts to AlGaN/GaN heterostructures was investigated. The fabrication of Si/Al-based alloyed ohmic contacts was accompanied by the rapid thermal annealing. The results were compared with similar results obtained for conventional Ti/Al/Ni/Au composition. An important point is that applying this composition allowed to reduce the thermal treatment temperature to 675–700°C that lead to improved morphology with extremely smooth surface of alloyed ohmic contacts in comparison with conventional composition. Temperature and time treatment dependencies of contact resistance for Si/Al contacts to AlGaN/GaN heterostructures were obtained. It turned out that the wide „processing window“ of thermal treatment without any noticeable changes of specific contact resistance value in the temperature range about 700–750°C was demonstrated. Moreover, the asymptotic reducing of the specific contact resistance by increasing annealing time within the temperature range 675–700°C was shown. After all, the minimum value of specific contact resistance of 0.41 Ohm · mm was obtained.