



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
АО «НИИМЭ»,
академик РАН

 Г.Я. Красников

«24» 01 2020 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации - Акционерного общества «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» на диссертационную работу Кондакова Михаила Николаевича «Омические контакты на основе системы металлизации Mo/Al/Mo/Au к гетероструктурам AlGa_N/Ga_N» по специальности 05.27.06 – «Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук

Актуальность и значимость результатов диссертации для развития соответствующей отрасли науки.

Уникальные свойства гетероперехода AlGa_N/Ga_N обусловили высокий интерес разработчиков СВЧ монолитных интегральных схем, а также силовых полевых транзисторов типа НЕМТ, развитие и, как следствие, промышленное внедрение электронных приборов на основе гетероструктур AlGa_N/Ga_N. Вместе с тем, до сих пор существует целый ряд проблем технологического, конструктивного и материаловедческого характера, сдерживающих совершенствование данных приборов до теоретически достижимого уровня. Одной из основных задач является получение воспроизводимого низкоомного омического контакта с хорошей морфологией поверхности.

Диссертационная работа Кондакова М.Н. посвящена разработке состава и технологии создания омических контактов на основе малоизученной в технической литературе системы металлизации Mo/Al/Mo/Au к гетероструктурам AlGa_N/Ga_N, а также исследованию эффектов твердофазных реакций, протекающих во время быстрого термического отжига контактов, и механизма токопереноса в них. В связи с этим, актуальность представленной диссертации не вызывает сомнений.

Научная новизна полученных результатов.

В работе получены новые научные результаты, среди которых необходимо отметить следующие:

- обнаружен эффект сохранения величины минимального переходного сопротивления омического контакта с увеличением общей толщины металлизации при сохранении выявленной и обоснованной автором пропорциональности толщин слоев в системе Mo/Al/Mo/Au.

- выявлено отсутствие влияния удельного сопротивления финишного слоя металла (Me) на итоговое контактное сопротивление в схеме металлизации Mo/Al/Mo/Me с различным финишным покрытием в виде Au, Ag или Cu; определена ключевая роль золота в качестве финишного покрытия при формировании омического контакта для достижения минимального переходного сопротивления, что обусловлено особенностями диффузионного перемешивания Au с другими слоями металлизации и AlGaN;

- предложен и обоснован способ измерения слоевого сопротивления двумерного электронного газа (ДЭГ) непосредственно под контактом, обладающий более высокой технологичностью и воспроизводимостью результатов по отношению к существующим методам измерений;

- определен механизм токопереноса для системы омического контакта Mo/Al/Mo/Au к гетероструктурам AlGaN/GaN.

Практическая ценность полученных результатов

Результаты работы имеют также и неоспоримую практическую ценность для разработки новых и модернизации существующих технологических процессов формирования омического контакта в технологическом цикле изготовления AlGaN/GaN СВЧ НЕМТ-транзисторов:

- разработана технология формирования омических контактов на основе системы металлизации Mo/Al/Mo/Au к нелегированным гетероструктурам $Al_xGa_{1-x}N/GaN$, позволившая получить воспроизводимое значение контактного сопротивления на уровне 0.14 – 0.20 Ом·мм;

- разработанная технология омического контакта на основе системы металлизации Mo/Al/Mo/Au к гетероструктурам $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ позволила одновременное его использование для формирования знаков совмещения при проведении процессов электронной литографии, что существенно упростило технологический процесс изготовления СВЧ НЕМТ на основе нитридгаллиевых гетероструктур;

- разработан способ измерения слоевого сопротивления ДЭГ непосредственно под контактом, позволивший упростить технологию создания

тестовых структур и повысить точность и воспроизводимость результатов по отношению к существующим методам.

Научная значимость и достоверность полученных результатов

Полученные в диссертации результаты представляют научный интерес и дают основание для дальнейших исследований наблюдаемых в работе эффектов системы металлизации Mo/Al/Mo/Au к гетероструктурам AlGaN/GaN, к коим следует отнести эффект влияния Au на образованием фаз AlMo₃, Al_{3+x}Mo_{1-x} и GaMo₃, а также эффект достижения минимального контактного сопротивления при сохранении строго определенной пропорциональности толщин слоев. Разработанный способ измерения слоевого сопротивления ДЭГ непосредственно под омическим контактом позволяет экстрагировать информацию, которую необходимо принимать во внимание при моделировании электро-физических параметров приборов на основе гетероструктур AlGaN/GaN.

Защищаемые положения диссертационной работы Кондакова М.Н. подтверждены использованием современного технологического, измерительного и исследовательского оборудования, современных методов исследований (XRD, AES, SEM, TEM, EDS, AFM), достаточной выборкой экспериментальных образцов и объемом измерений, а также непротиворечивостью полученных результатов с классическими представлениями физики полупроводников.

Общая характеристика работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Объем работы составляет 182 страницы машинописного текста, включая 90 рисунков, 21 таблицу и список литературы из 172 наименований.

В первой главе представлен литературный обзор в области технологии формирования омических контактов к GaN и гетероструктурам на его основе. Рассмотрены различные технологии формирования контактов, различные схемы металлизации, в том числе на основе тугоплавких металлов, механизмы твердофазных превращений, лежащих в основе формирования омических контактов к Al_xGa_{1-x}N, и другие эффекты, объясняющие многообразие ВАХ приборов. Обоснован выбор объекта исследований диссертационной работы в пользу системы металлизации Mo/Al/Mo/Au.

Во второй главе приведено описание конструкций и технологии изготовления исследуемых гетероструктур – комбинаций слоёв твердых растворов Al_xGa_{1-x}N с формированием ДЭГ на границе гетероперехода, реализованных на подложках сапфира. Описаны физико-конструктивные принципы, на которых построены методы измерения контактного и переходного сопротивления

омического контакта, сформулированы их недостатки. Предложен новый подход к измерению сопротивления омического контакта, основанный на совмещении измерений слоевого сопротивления металлизации и измерений слоевого сопротивления ДЭГ вне контакта методом TLM с измерением слоевого сопротивления ДЭГ под омическим контактом методом, основанном на определении зависимости сопротивления протеканию тока под полосками омических контактов от их протяженности. Проведено сравнение данного метода с традиционно используемыми методами «раздельного вольт-амперного измерения» (SCVM) и «измерения дополнительного сопротивления» (ERM) с точки зрения воспроизводимости получаемых результатов.

В третьей главе проведены исследования вопросов технологического характера по выбору и оптимизации режимов отжига омических контактов и соотношений толщин слоев системы металлизации Mo/Al/Mo/Au к AlGa_n. Определено, что при толщинах слоев данной системы металлизации 10/55/50/50 нм достигается крайне низкое значение ρ_c и R_c – $4.7 \cdot 10^{-7}$ Ом·см² и 0.14 Ом·мм, соответственно. На основании дифрактометрического анализа сделан вывод об интенсивном диффузионном перемешивании металлов в процессе термического отжига, а также связи формируемых интерметаллических соединений с поведением ВАХ контактов. Кроме того, проведены исследования качества захвата электронным лучом знаков совмещения в зависимости от значений толщин слоев металлизации контакта.

В четвертой главе приведены результаты исследования микроструктуры контактов на основе систем металлизации Mo/Al/Mo/Au и Ti/Al. Путем элементного анализа методами Оже-спектроскопии исследованы зависимости наблюдаемых фазовых состояний интерметаллитов от условий формирования омического контакта и сделаны выводы о связи состояний интерметаллитов с особенностями поведения ВАХ и морфологией поверхности контактов, а также о различии механизмов формирования контактов на основе систем Mo/Al/Mo/Au и Ti/Al.

В пятой главе проведены результаты исследования механизма токопереноса в контактах на основе Mo/Al/Mo/Au к гетероструктурам Al_xGa_{1-x}N/GaN. Экспериментально получены и теоретически объяснены температурные зависимости переходного контактного сопротивления в диапазоне температур 300 – 473 К, что позволило сделать вывод о термополевой природе токопереноса в омическом контакте. Кроме того, показано, что для неплавляемых контактов на основе Mo/Al/Mo/Au и Ti/Al/Mo/Au слоевое сопротивление двумерного электронного газа под контактами незначительно отличается от слоевого сопротивления гетероструктуры вне контактных площадок.

Замечания по работе

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. Формулировки положений научной новизны по п.п.1, 3, 5 и 6 не содержат непосредственно элементов научной новизны, обосновывающих научные заключения и качественно отличающие полученные результаты от аналогичных, если таковые имеются - это не позволяет достоверно оценить их научную ценность. Между тем следует отметить, что в тексте диссертации научные обоснования присутствуют.
2. Многократное использование термина «оптимизация» в отношении режимов формирования омического контакта не подкреплено критерием, по которому оценивается оптимальность.
3. В работе предложен оригинальный метод измерения сопротивления переходного слоя омического контакта, обладающий по сравнению с известными лучшей воспроизводимостью и достоверностью получаемых результатов. Однако, автором не обоснована точность данного метода измерений, что является необходимым и крайне важным условием его использования.
4. Множественные недосмотры при оформлении диссертационной работы, например: на страницах 138, 139, 145, 150, 153 помещены рисунки, подписи же к ним перенесены на следующие страницы; упомянутый в тексте на стр. 62-63 рисунок 25 отсутствует, хотя имеет подрисуночный текст; нумерация выводов по работе на стр. 160-161 нарушена и т. п.

Заключение

Отмеченные недостатки не влияют на общую высокую оценку диссертационной работы.

В диссертационной работе Кондакова М.Н. приведены научные результаты, позволяющие квалифицировать их как новые научные знания. Полученные автором данные достоверны, выводы и заключения обоснованы. Работа базируется на достаточном числе исходных предпосылок, результатов экспериментальных исследований, разработок и оценок. Тема работы соответствует паспорту научной специальности, а результаты диссертации имеют существенное научное и практическое значение.

Представленная диссертационная работа прошла необходимую апробацию на всероссийских и международных конференциях, основные её результаты опубликованы в ряде реферируемых журналов, что подтверждает их достоверность. Постановка задач исследования, методики их реализации, полученные результаты

изложены с достаточной степенью подробности. Диссертация написана понятным языком, стиль изложения в целом ясный.

Диссертация, является завершённой квалификационной работой, содержит новые научные результаты, отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней в Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС», а ее автор, Кондаков Михаил Николаевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.27.06 – «Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники».

Доклад по диссертационной работе и отзыв на него заслушаны и обсуждены на НТС АО «НИИМЭ» 24 января 2020года, протокол № 1.

Адрес организации: 124460, Российская Федерация, Москва, Зеленоград,
1-ый Западный проезд,12/1.

Тел.: +7 495 229-72-99, +7 495 229-70-00

Эл. почта: niime@niime.ru

Веб-сайт: <https://www.niime.ru/>

Заместитель генерального директора
АО «НИИМЭ», д.т.н., профессор



П.В. Панасенко