

ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СЛОИ И МНОГОСЛОЙНЫЕ КОМПОЗИЦИИ

EPITAXIAL LAYERS AND MULTILAYERED COMPOSITIONS

УДК 548.4

ПРОЦЕССЫ ВО ВРЕМЯ ОТЖИГА КОНТАКТНЫХ СИСТЕМ Ti–Al–Ni И Ti–Al–Ni–Au

© 2014 г. К. Д. Ванюхин, Р. В. Захарченко,
Н. И. Каргин, М. В. Пашков, Л. А. Сейдман

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Институт функциональной ядерной электроники,
Каширское шоссе, д. 31, Москва, 115409, Россия,*

Введение

Наиболее распространенная контактная металлизация нитрида галлия к *n*-типу проводимости — это многослойная система Ti/Al/Ni/Au. Помимо известных достоинств, ей присущ один недостаток: морфология поверхности типичных контактов Ti/Al/Ni/Au после их отжига не гладкая, а бугорчатая. Измеренная высота неровностей превышает 300 нм [1–4], что создает проблемы при проведении последующих литографических процессов изготовления прибора. Существуют различные мнения о причинах этой проблемы, в том числе — предположение об агломерации расплавленного алюминия при температурах отжига выше температуры плавления алюминия [1, 2, 5]. В работе [6] было установлено, что на поверхности двухслойной металлизации Ti/Al после ее отжига возникают неровности в виде шероховатости с разностью между выступами и впадинами

порядка 20–30 нм, а не куполообразные выпуклости, как это происходит у многослойной металлизации Ti/Al/Ni/Au. Таким образом, гипотеза о возникновении крупной шероховатости в виде бугров в результате плавления алюминия при высоких температурах отжига не подтвердилась. Следовательно, в возникновении куполообразных выпуклостей на поверхности многослойной металлизации Ti/Al/Ni/Au большую роль могут играть слои никеля и золота [3].

Ниже рассмотрены результаты работы, которая стала продолжением предыдущей [6]. Цель работы — выяснение, какой из возможных механизмов образования грубой бугорчатой поверхности превалирует и какие существуют пути уменьшения этого недостатка. Исследовали возможность образования во время отжига шероховатой поверхности при взаимодействии металлов в многослойных металлизациях титан—алюминий—никель и титан—алюминий—никель—золото.

Изучены механизмы образования грубой бугорчатой поверхности для наиболее распространенной контактной металлизации к *n*-типу нитрида галлия — многослойной системе Ti/Al/Ni/Au, а также пути уменьшения этого недостатка, который создает проблемы при проведении последующей литографии. Исследовано образование во время отжига шероховатой поверхности при взаимодействии металлов в многослойных металлизациях Ti/Al/Ni и Ti/Al/Ni/Au. Повышение поверхностного сопротивления обоих металлизаций с ростом температуры отжига объяснено взаимной диффузией металлов, ростом степени их взаимодействия с образованием различных их интерметаллических соединений, имеющих существенно большее удельное сопротивление, чем исходные металлы. Подтверждено наличие в исследуемой трехслойной металлизации Ti/Al/Ni после отжига следующих основных фаз: NiTi, Al₃Ti, и Ni₂Al₃. Обнаружен рост шероховатости поверхности после отжига. Куполообразные выпуклости, какие образуются у многослойной металлизации Ti/Al/Ni/Au, на поверхности не выявлено. Эту гипотезу подтверждает каплеобразование в сплаве алюминия с никелем. Количество образующейся при отжиге жидкой фазы Au–Al, являющейся причиной образования грубой поверхности металлизации Ti/Al/Ni/Au, удалось, уменьшив снизив толщину слоя золота до минимума, при котором контраст элементов металлизации по отношению к поверхности полупроводника достаточен для самосовмещения при электронной литографии. Показано, что слой золота толщиной 50 нм достаточно для получения необходимого контраста. При такой толщине золота морфология поверхности значительно улучшилась: шероховатость уменьшилась с 300 до 80 нм, и поверхность стала блестящей.

Ключевые слова: омические контакты, контактная металлизация, нитрид галлия, многослойная металлизация, термическое испарение, термический отжиг металлизации

Ванюхин Кирилл Дмитриевич — инженер; **Захарченко Роман Викторович** — инженер; **Каргин Николай Иванович** — доктор технических наук, профессор, первый заместитель директора ИФЯЭ; **Пашков Михаил Викторович** — аспирант; **Сейдман Лев Александрович** — кандидат техн. наук, старший научный сотрудник, зав. лабораторией, e-mail: seid1@yandex.ru.

Образцы и методы исследования

Экспериментальные условия данной работы аналогичны условиям работы [6]. В качестве подложек использовали пластины кремния диаметром 76 мм с пленкой нитрида кремния толщиной 0,15 мкм, нанесенной методом CVD на установке SPTS LPX CVD. Пленка нитрида кремния позволяет исключить взаимодействие системы металлизации с материалом подложки. Это дает возможность исследовать в чистом виде результаты взаимодействия пленок многослойной системы металлизации во время отжига.

На подложки наносили трехслойную Ti(12 нм)/Al(135 нм)/Ni(57 нм) или четырехслойную Ti(12 нм)/Al(135 нм)/Ni(57 нм)/Au(50 или 300 нм) металлизацию. Большое значение соотношения толщин пленок алюминия и титана было такое же, как и в работе [6]. Оно было сохранено для оценки, главным образом, взаимодействия никеля с остальными металлами в трехслойной металлизации.

Нанесение металлизации проводили в установке Kurt J. Lesker PVD 75. Испарение металлов вели из вольфрамовых лодочек. Расстояние от испарителя до подложек составляло 215 мм. Подложки во время нанесения пленок не нагревали. Скорость нанесения поддерживали постоянной с помощью кварцевого датчика скорости нанесения и толщины пленки. Испарение останавливали по достижении заданной толщины пленки. После нанесения металлизации подложки подвергали отжигу в потоке азота в печи RTP-600S. Длительность отжига составляла 300 с при температурах в диапазоне 400—700 °С и/или 30 с при температуре 850 °С. После каждого отжига образцов результаты термообработки оценивали по поверхностному сопротивлению металлизации, матовости ее поверхности (оценивали визуально) и морфологии поверхности металлизации.

Толщину пленок проверяли на профилометре DektalXT Stylus Profiling System (Bruker Nano GmbH, Германия). Поверхностное сопротивление металлизации измеряли на четырехзондовой установке RMS-EL. Морфологию поверхности полученных систем металлизации оценивали на лазерном микроскопе 3D Measuring Laser Microscope OLS4000. Контроль фазового состава осуществляли рентгенодифракционным методом на однокристалльном многофункциональном дифрактометре ХМД-30, оснащенном поликапиллярной оптикой Кумахова.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Кремниевые подложки, покрытые нитридом кремния, с нанесенной на них металлизацией Ti/Al/Ni, отжигали сначала в течение 300 с при температуре, лежащей в диапазоне 400—700 °С (первая стадия отжига). После отжига контролировали поверхностное сопротивление металлизации (табл. 1). Затем об-

разцы подвергали второй стадии: быстрому отжигу в течение 30 с при 850 °С, и снова измеряли поверхностное сопротивление металлизации (см. табл. 1).

После одностадийного отжига поверхностное сопротивление металлизации росло с повышением температуры отжига. Это можно объяснить взаимной диффузией металлов, ростом степени их взаимодействия с образованием различных их интерметаллических соединений, имеющих существенно большее удельное сопротивление, чем исходные металлы. Как видно из табл. 1, заметное взаимодействие уже произошло за 300 с при 400 °С, что проявилось в росте поверхностного сопротивления покрытия до 1,9 Ом/□, но смешение металлов еще не успело пройти до конца. Более высокая степень взаимодействия была достигнута при температуре отжига 500 °С, после которого сопротивление возросло до 2 Ом/□. А одностадийный отжиг при более высоких температурах 600 и 700 °С привел к еще более значительному возрастанию поверхностного сопротивления металлизации (см. табл. 1).

Как видно из табл. 1, вторая стадия отжига длительностью 30 с при 850 °С привела к дальнейшему увеличению поверхностного сопротивления металлизации до предельного для данной конструкции металлизации значения, превышающего 4 Ом/□, независимо от наличия или отсутствия первой стадии отжига. То есть поверхностное сопротивление увеличилось на порядок по сравнению со значением для металлизации после нанесения. Это свидетельствует о том, что взаимодействие металлов в пленке продолжается во время кратковременной второй высокотемпературной стадии отжига и заканчивается практически полным завершением смешения металлов и их взаимодействия, в результате которого формируются различные интерметаллидные фазы.

Это было подтверждено с помощью метода рентгеновской дифрактометрии, в исследуемой трех-

Таблица 1

Поверхностное сопротивление металлизации Ti/Al/Ni после первой и второй стадий отжига

Температура обработки, °С		Поверхностное сопротивление*, Ом/□	
Первая стадия (300 с)	Вторая стадия (30 с)	После первой стадии	После второй стадии
400	850	1,9	4,1
500		2,0	4,0
600		2,5	4,0
700		4,4	4,4
—		—	3,9

* Исходное поверхностное сопротивление металлизации Ti/Al/Ni до отжига составило 0,43 Ом/□.

слоистой металлизации после отжига было выявлено наличие следующих основных фаз: NiTi, Al₃Ti и Ni₂Al₃ (рис. 1). То есть все три металла образовали между собой интерметаллидные химические соединения и соответствующие им фазы. Это согласуется с результатами, полученными, например, в работах [5, 7] методом рентгеновского послойного анализа (XPS), выявившим, что первоначально слоистая структура после отжига превращается благодаря взаимной диффузии в слой соединений этих металлов.

Одновременно с изменениями сопротивления металлизации произошли изменения внешнего вида и морфологии поверхности металлизации в результате отжига (табл. 2). После первой стадии отжига поверхность стала на вид слегка матовой, причем матовость увеличивалась с ростом температуры отжига. Эту матовость можно объяснить шероховатостью поверхности, возросшей в результате рекристаллизационных процессов в многослойной металлизации.

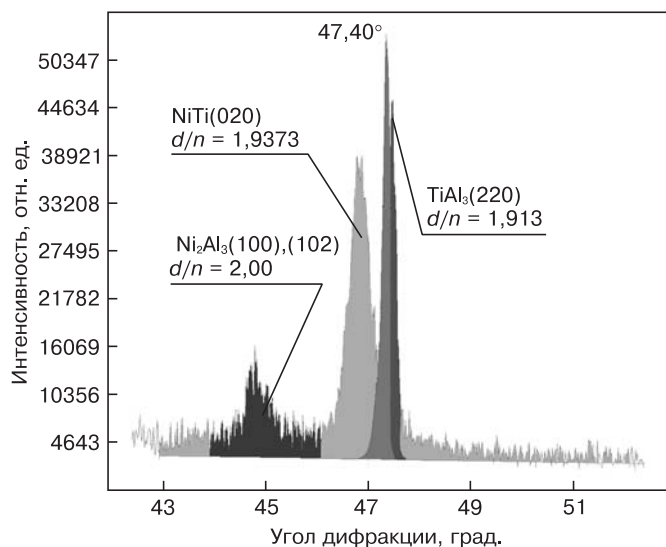


Рис. 1. Рентгенограммы образца после двухступенчатого отжига: 300 с при 700 °С и 30 с при 850 °С

Таблица 2

Шероховатость металлизации Ti/Al/Ni после первой и второй стадий отжига.

Температура обработки, °С		Шероховатость*, нм	
Первая стадия (300 с)	Вторая стадия (30 с)	После первой стадии	После второй стадии
400	850	30	70
500		43	74
600		50	100
700		57	130
—		—	—

*Шероховатость до отжига составляла 10—20 нм.

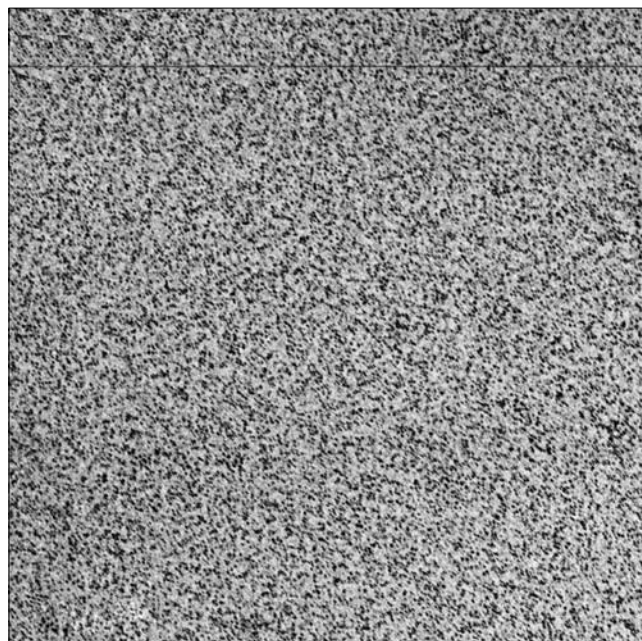


Рис. 2. Морфология поверхности трехслойной металлизации Ti/Al/Ni на подложке из кремния, покрытого нитридом кремния, после двухстадийного отжига: первой стадии отжига в течение 300 с при 600 °С и второй стадии отжига в течение 30 с при 850 °С. Размеры показанной поверхности 65 × 65 мкм²

Шероховатость количественно оценивали в данном случае как разность высот выступов и впадин на поверхности металлизации. Поверхность пленки до отжига наследовала шероховатость подложки, которая увеличивалась вследствие ростовых явлений в металлических пленках до 10—20 нм. После одностадийного отжига шероховатость поверхности различных образцов выросла до значения 30—57 нм, а после второй стадии она еще увеличилась до 70—130 нм. Такая рекристаллизационная шероховатость способна рассеивать свет и создать впечатление легкой матовости.

Интересно, что здесь быстрый отжиг при высокой температуре (30 с при 850 °С) создает такую же шероховатость, как и длительный отжиг при температуре 500—700 °С. Это подтверждает диффузионный характер взаимодействия металлов в многослойной системе и рекристаллизационных процессов, формирующих новую кристаллическую структуру металлизации во время отжига.

Типичный вид морфологии поверхности трехслойной металлизации Ti/Al/Ni после ее отжига, полученный в сканирующем лазерном микроскопе, приведен на рис. 2. В отличие от вида морфологии поверхности двухслойной металлизации Ti/Al [6], демонстрировавшей различную цветность отдельных областей поверхности металлизации, в рассматриваемом случае поверхность всех образцов была однотонной. То есть лазерный микроскоп не выявил на поверхности образцов областей различного состава или структуры, что говорит об однородности металлизации после ее отжига.

Полученная в тех же условиях четырехслойная металлизация Ti(12 нм)/Al(135 нм)/Ni(57 нм)/Au(300 нм) после отжига изменила цвет от золотого к серебристо-серому. Поверхностное сопротивление металлизации до отжига составило 0,14—0,16 Ом/□, после отжига ее сопротивление повысилось до 2—12 Ом/□. Таким образом, сопротивление металлизации возросло в 60 раз и стало примерно равно сопротивлению трехслойной металлизации Ti(12 нм)/Al(135 нм)/Ni(57 нм).

Взаимодействие металлических слоев в многослойной системе металлизации при ее отжиге начинается при довольно низких температурах. Так, взаимодействие алюминия с соседними слоями металлов начинается с титаном при 325 °С и с никелем при 275 °С [7]. Взаимодействие начинается на границе раздела слоев путем диффузии [7]. Поэтому при температурах, использованных для отжига контактов (см. табл. 1), все взаимодействия или идут интенсивно, или уже закончились.

Действительно, во многих работах показано, что во время отжига при 900 °С уже за 30 с [5] происходило перемешивание титана, алюминия, никеля и золота в четырехслойной системе металлизации. Как уже было показано выше (см. рис. 1), в трехслойной системе металлизации произошло полное взаимодействие всех трех металлов и превращение трехслойной металлизации в единый слой, состоящий из смеси трех фаз: NiTi, Al₃Ti и Ni₂Al₃. Так как толщина пленки титана в подобной трехслойной металлизации мала по сравнению с толщинами остальных пленок, то можно считать, что металлизация после отжига состоит, в основном, из фазы Ni₂Al₃.

Образование фазы Ni₂Al₃ обусловлено определенным соотношением толщин пленок алюминия и никеля. При данном соотношении толщин пленок алюминия и никеля (135/57 = 2,37), соответствующее соотношение атомов этих металлов в металлизации составляет 1,56, что характерно для фазы Al₃Ni₂, действительно обнаруженной в отожженной металлизации. Эта фаза имеет температуру плавления

1133 °С, которая существенно выше температуры отжига. Как было отмечено в работе [6], температуры плавления двух остальных фаз тоже высоки. Поэтому появления жидкой фазы не отмечено ни в одном режиме отжига (см. табл. 1).

Как было показано выше (см. рис. 2), с помощью лазерного микроскопа не удалось выявить на поверхности отожженных образцов трехслойной металлизации Ti/Al/Ni областей различного состава или структуры. Следовательно, на поверхности металлизации, состоящей, в основном, из фазы Ni₂Al₃, не обнаружено достаточно крупных кристаллов других интерметаллидных соединений NiTi и Al₃Ti.

Судя по изменению поверхностного сопротивления металлизации, существенное смещение металлов в трехслойной металлизации Ti—Al—Ni произошло при 700 °С за 300 с и при 830 °С за 30 с (см. табл. 1). Поскольку для образования омического контакта при быстром отжиге используют высокие температуры 800—900 °С [8], то указанные процессы взаимодействия металлов в покрытии идут одновременно. Причем, по-видимому, быстрее идут процессы, которые имеют место при существенно более низких температурах, т. е. диффузионное взаимодействие металлов.

Полученная рекристаллизационная шероховатость металлизации Ti/Al/Ni соответствует рекристаллизационной шероховатости двухслойной металлизации Ti/Al, исследованной в работе [6]. При этом шероховатость существенно отличается визуально от поверхности отожженной металлизации Ti/Al/Ni/Au (рис. 3), матовость которой была обусловлена куполообразными выступами. Природу этих выступов установили в работах [5, 9, 10]: сплав Ni—Al и расплав сплава Au—Al не растворяются взаимно, а образуются преципитаты — большие зерна сплава Ni—Al, окруженные расплавом сплава Au—Al. Преципитаты распределены случайно и имеют различные размеры. Этим же объясняется то, что нанесение слоя золота практически не сказалось на проводимости металлизации после ее отжига. Удельное сопротивление этих фаз (AlNi и Al₂Au), сформированных в отожженных контактах, было экспериментально измерено в работе [9]. Удельное сопротивление фазы AlNi составило $1,1 \cdot 10^{-4}$ Ом·см, что выше, чем у содержащих золото фаз Al—Au: $3,0 \cdot 10^{-5}$ Ом·см для AlAu₄ и $2,6 \cdot 10^{-5}$ Ом·см для Al₂Au. Этот результат показывает, что зерна фазы Al₂Au образуют предпочтительные пути для прохождения электрического тока через металлизацию. При этом образование фазы Al₂Au ответственно за более высокую шероховатость поверхности контакта [2, 9].

Таким образом, чтобы не допустить во время отжига образования жидкой фазы сплава Au—Al, являющейся причиной формирования грубой поверхности металлизации, возможны следующие подходы.

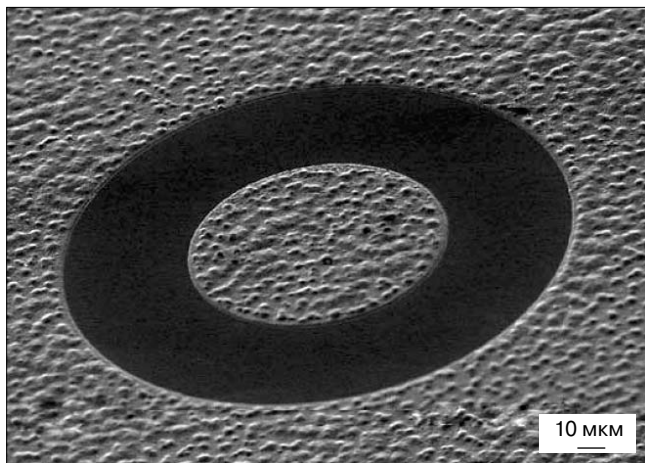


Рис. 3. Морфология поверхности контактов Ti/Al/Ni/Au, полученная на сканирующем электронном микроскопе [2]

1. Уменьшение количества золота в металлизации для уменьшения объема возможной жидкой фазы [3]. При этом отметим, что количество золота не влияет на величину контактного сопротивления [3].

2. Существенное уменьшение взаимодействия алюминия с золотом за счет применения вместо никеля более эффективных барьерных слоев из тугоплавких металлов, например молибдена, или их силицидов [11]. В частности, системы металлизации со слоем молибдена в качестве барьерного слоя [11] после отжига имели шероховатость, примерно равную рекристаллизационной шероховатости, измеренной в данной работе у трехслойной металлизации.

Оба эти подхода используются различными исследователями в технологии изготовления приборов на основе нитрида галлия. Авторам настоящей работы удалось уменьшить количество образующейся при отжиге жидкой фазы Au–Al, являющейся причиной формирования грубой поверхности металлизации, снизив толщину слоя золота до минимума, при котором контраст элементов металлизации по отношению к поверхности полупроводника достаточен для самосовмещения при электронной литографии. Эксперимент показал, что слоя золота толщиной 50 нм достаточно для получения необходимого контраста. После отжига контактов контраст не уменьшился, хотя атомы золота диффундировали в глубину металлизации. При такой толщине золота морфология поверхности значительно улучшилась: шероховатость (средняя разность высот и впадин) уменьшилась с 300 до 80 нм, и поверхность стала блестящей.

Заключение

Показано, что шероховатость трехслойной металлизации Ti/Al/Ni возрастает после ее отжига из-за диффузионного взаимодействия металлов, образования интерметаллидных фаз и их рекристаллизации. Но на ее поверхности не обнаружено куполообразных выпуклостей, какие образуются у многослойной металлизации Ti/Al/Ni/Au во время отжига, являющейся результатом формирования жидкой фазы из интерметаллидного сплава алюминий—

золото. Следовательно, гипотеза о каплеобразовании в сплаве алюминия с никелем не подтвердилась. Установлено, что во время отжига металлизации Ti/Al/Ni/Au жидкая фаза образуется из сплава Au–Al. Поэтому один из практических путей снижения шероховатости многослойной металлизации Ti/Al/Ni/Au после отжига — снижение толщины слоя золота до 50 нм. Выявлено, что при такой толщине золота морфология поверхности значительно улучшилась: шероховатость уменьшилась с 300 до 80 нм, и поверхность стала блестящей.

Библиографический список

1. **Jacobs, B.** Towards integrated AlGaIn/GaN based X-band high-power amplifiers. Proefschrift / B. Jacobs. – Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2004. – 204 p.
2. **Jacobs, B.** Optimisation of the Ti/Al/Ni/Au ohmic contact on AlGaIn/GaN FET structures / B. Jacobs, M. C. J. C. M. Kramer, E. J. Geluk, F. Karouta // J. Cryst. Growth. – 2002. – V. 241. – P. 15–18.
3. **Xin, H. P.** Optimization of AlGaIn/GaN HEMT Ohmic contacts for improved surface morphology with low contact resistance. / H. P. Xin, S. Poust, W. Sutton, D. Li, D. Lam, I. Smorchkova, R. Sandhu, B. Heying, J. Uyeda, M. Barsky, M. Wojtowicz, R. Lai // CS MAN-TECH Conf. – Portland (Oregon, USA), 2010. – P. 149–152.
4. **Васильев, А. Г.** СВЧ приборы и устройства на широкозонных полупроводниках / А. Г. Васильев, Ю. В. Колковский, Ю. А. Концевой. – М.: Техносфера, 2011. – 416 с.
5. **Boudart, B.** Comparison between TiAl and TiAlNiAu Ohmic Contacts to n-type GaN / B. Boudart, S. Trassaert, X. Wal-lart, J. C. Pesant, O. Yaradou, D. Théron, Y. Crosnier, H. Lahreche, F. Omnes // J. Electron. Mater. – 2000. – V. 29, N 5. – P. 603–606.
6. **Ванюхин, К. Д.** Исследование структуры и морфологии поверхности двухслойной контактной металлизации Ti/Al / К. Д. Ванюхин, Р. В. Захарченко, Н. И. Каргин, М. В. Пашков, Л. А. Сейдман // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. – 2013. – № 3. – С. 60–65.
7. Тонкие пленки. Взаимная диффузия и реакции / Под ред. Дж. Поута, К. Ту, Дж. Мейера. – М.: Мир, 1982. – 576 с.
8. **Feng, Q.** The improvement of ohmic contact of Ti/Al/Ni/Au to AlGaIn/GaN HEMT by multi-step annealing method / Q. Feng, L. M. Li, Y. Hao, J. Y. Ni, J. C. Zhang // Solid-State Electronics. – 2009. – V. 53, N 9. – P. 955–958.
9. **Roccaforte, F.** Nanoscale carrier transport in Ti/Al/Ni/Au Ohmic contacts on AlGaIn epilayers grown on Si(111) / F. Roccaforte, F. Iucolano, F. Giannazzo, A. Alberti, V. Raineri // Appl. Phys. Lett. – 2006. – V. 89, Iss. 2. – P. 022103 1–3.
10. **Bright, A. N.** Correlation of contact resistance with microstructure for Au/Ni/Al/Ti/AlGaIn/GaN ohmic contacts using transmission electron microscopy / A. N. Bright, P. J. Thomas, M. Weyland, D. M. Tricker, C. J. Humphreys, R. Davies // J. Appl. Phys. – 2001. – V. 89, N 6. – P. 3144–3150.
11. **Selvanathan, D.** Comparative study of Ti/Al/Mo/Au, Mo/Al/Mo/Au, and V/Al/Mo/Au ohmic contacts to AlGaIn/GaN heterostructures / D. Selvanathan, F. M. Mohammed, A. Tesfayesus, I. Adesida // J. Vac. Sci. Technol. B. – 2004. – V. 22. – P. 2409–2416.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования РФ с использованием оборудования ЦКП «Гетероструктурная СВЧ–электроника и физика широкозонных полупроводников», в том числе в рамках проекта «Разработка конструкции и промышленной технологии изготовления твердотельных компонентов на широкозонном материале GaN» №138/2010У от 10.08.2010 г.

Авторы благодарны сотрудникам ОАО «НПП «Пульсар» с. н. с. А. В. Лютцау и с.н.с. Э. М. Темпер за проведенные рентгеноструктурные исследования.

Статья поступила в редакцию 9 декабря 2013 г.

Processes During Annealing of Ti–Al–Ni and Ti–Al–Ni–Au Contact Metallization Systems

Kirill Dmitrievich Vanyukhin¹ — Engineer; **Roman Viktorovich Zakharchenko**¹ — Engineer; **Nikolai Ivanovich Kargin**¹ — Dr. Sci. (Eng.), Professor, Deputy Director IFNE; **Mikhail Viktorovich Pashkov**¹ — Postgraduate Student; **Lev Aleksandrovich Seidman**¹ — Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Head of Laboratory (seid1@yandex.ru)

¹**National Research Nuclear University MEPhI
Institute of Functional Nuclear Electronics NRNU MEPhI
31 Kashirskoe Highway, Moscow 115409, Russia**

Abstract. The Ti/Al/Ni/Au metallization system which is widely used in the technology of GaN based devices has a very important disadvantage: after annealing in nitrogen atmosphere for 30 sec. at temperature 850 °C it has rough surface with 300 nm hillocks. This creates troubles for lithographic processes. The aim of this work is to investigate the mechanism that generates the roughness of this surface and ways to minimize this disadvantage. We have studied the formation of rough surface in Ti/Al/Ni and Ti/Al/Ni/Au multilayer metallization systems. The resistivity of the metallization sheet increases with an increase of annealing temperature. This can be attributed to the mutual diffusion of metals and their active interaction with the formation of intermetallic phases. X-ray analysis proved the appearance of the following basic intermetallic phases: NiTi, Al₃Ti, и Ni₂Al₃ in the metallization systems. After annealing the surface of metallization system Ti/Al/Ni becomes rougher; however, large hemispherical convexes (as in the Ti/Al/Ni/Au metallization system) are not generated. Thus, the hypothesis of balling-up of molten Al–Ni alloy on the surface of metallization system Ti/Al/Ni has not been confirmed.

To decrease the amount of Au–Al liquid phase that causes the rough surface of Ti/Al/Ni/Au metallization we reduced the thickness of the Au layer to 50 nm. At this Au layer thickness the surface morphology of metallization became much better: roughness reduced from 300 nm to 80 nm and the surface became specular.

Keywords: ohmic contacts, contact metallizations, GaN, multilayer metallizations, thermal evaporation, thermal annealing of metallization.

References

1. Jacobs B. Towards Integrated AlGaIn/GaN Based X-Band High-Power Amplifiers. Proefschrift. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2004. 204 p.
2. Jacobs B., Kramer M. C. J. C. M., Geluk E. J., Karouta F. Optimisation of the Ti/Al/Ni/Au ohmic contact on AlGaIn/GaN FET structures. *J. Cryst. Growth*. 2002, vol. 241, pp. 15–18.
3. Xin H. P., Poust S., Sutton W., Li D., Lam D., Smorchkova I., Sandhu R., Heying B., Uyeda J., Barsky M., Wojtowicz M., Lai R.

Optimization of AlGaIn/GaN HEMT Ohmic Contacts for Improved Surface Morphology with Low Contact Resistance. *CS MANTECH Conf.* Portland (Oregon, USA), 2010. pp. 149–152.

4. Vasil'ev A. G., Kolkovskii Yu. V., Kontsevoi Yu. A. *SVCh pribory i ustroystva na shirokazonnykh poluprovodnikakh* [Microwave devices and devices for wide-gap semiconductors]. Moscow: Tekhnosfera, 2011, 416 p. (In Russ.)

5. Boudart B., Trassaert S., Wallart X., Pesant J. C., Yaradou O., Théron D., Crosnier Y., Lahreche H., Omnes F. Comparison between TiAl and TiAlNiAu. Ohmic contacts to n-type GaN. *J. Electron. Mater.* 2000, vol. 29, no. 5, pp. 603–606.

6. Vanyukhin K. D., Zakharchenko R. V., Kargin N. I., Pashkov M. V., Seidman L. A. Research of Structure and Surface Morphology of Two-Layer Contact Ti/Al Metallization. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2013, no. 3, pp. 60–65.

7. Tonkie plenki. *Vzaimnaya diffuziya i reaktsii* [Thin films. Mutual diffusion and reaction.] Ed. Dzh. Pouta, K. Tu, Dzh. Meiera. Moscow: Mir, 1982. 576 p.

8. Feng Q., Li L. M., Hao Y., Ni J. Y., Zhang J. C. The improvement of ohmic contact of Ti/Al/Ni/Au to AlGaIn/GaN HEMT by multi-step annealing method. *Solid-State Electronics*. 2009, vol. 53, pp. 955–958.

9. Roccaforte F., Iucolano F., Giannazzo F., Alberti A., Raineri V. Nanoscale carrier transport in Ti/Al/Ni/Au Ohmic contacts on AlGaIn epilayers grown on Si(111). *Appl. Phys. Lett.* 2006, vol. 89, pp. 022103 1–3.

10. Bright A. N., Thomas P. J., Weyland M., Tricker D. M., Humphreys C. J., Davies R. Correlation of contact resistance with microstructure for Au/Ni/Al/Ti/AlGaIn/GaN ohmic contacts using transmission electron microscopy. *J. Appl. Phys.* 2001, vol. 89, no. 6, pp. 3144–3150.

11. Selvanathan D., Mohammed F. M., Tesfayesus A., Adesida I. Comparative study of Ti/Al/Mo/Au, Mo/Al/Mo/Au, and V/Al/Mo/Au ohmic contacts to AlGaIn/GaN heterostructures. *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2004, vol. 22, pp. 2409–2416.

Acknowledgements. This work was supported by the Ministry of Education using equipment NBI «Heterostructure microwave electronics and physics of wide bandgap semiconductors», including in the framework of the project «Development of the construction and industrial manufacturing technology of solid state components for wide-material GaN» No. 138/2010U as of 10.08.2010.

The authors thank the staff of SPE Pulsar Senior Researcher A. V. Lyuttsau and Senior Researcher E. M. Temper for carrying out X-ray diffraction studies.

Received December 9, 2013