

ИССЛЕДОВАНИЯ МЕДНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ КОНТАКТНЫХ ПЛОЩАДОК КРЕМНИЕВЫХ КРИСТАЛЛОВ

А. А. Стоянов¹, А. Е. Бормонтон¹, С. И. Рембеза², В. В. Зенин²

¹ – ОАО «Научно-исследовательский институт электронной техники»,

² – Воронежский государственный технический университет

Поступила в редакцию 03.09.2015 г.

Аннотация. Проанализированы особенности применения медной металлизации на контактных площадках кремниевых кристаллов полупроводниковых изделий микроэлектроники. Рассмотрены поверхностное и удельное сопротивления Cu металлизации, покрытой защитной Ni пленкой после напыления и отжига в H₂ при температуре 400 °С. Проведены исследования микроструктуры, химического состава и микротвёрдости данной металлизации методом Кнупа. Исследования микротвёрдости показали, что металлизация с мелкими зёрнами (до отжига) обладает более высокой микротвёрдостью, чем крупнозернистая (после отжига). Некоторое снижение микротвёрдости покрытий Cu-Ni практически не влияет на качество микросварных соединений.

Ключевые слова: кремниевые кристаллы, контактные площадки, медная металлизация.

THE RESEARCH ON THE COPPER METALLIZATION OF CONTACT PADS OF SILICON CRYSTALS

A. A. Stoyanov, A. E. Bormontov, S. I. Rembeza, V. V. Zenin

Abstract. Features of application of copper metallization on contact pads of silicon crystals of semiconductor ware of microelectronics were analyzed. Surface resistance and specific resistance of Cu metallization, covered with protective Ni film after deposition and annealing in H₂ at 400 °С were considered. Microstructure, chemical composition and microhardness of copper metallization were investigated. Investigation of microhardness was carried out using Knoop microhardness test. Microhardness investigation showed that the metallization with fine grains (before annealing) has microhardness higher than metallization with coarse grains (after annealing). Some decrease in the microhardness of Cu-Ni coverings almost does not affect the quality of microwelded connections.

Keywords: silicon crystals, contact pads, copper metallization.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие полупроводниковой технологии направлено на увеличение числа элементов на кристаллах и увеличение длины межсоединений, что приводит к проблеме задержки сигналов в соединительных линиях. Эта задача решается заменой алюминиевой металлизации на медную [1]–[3]. Основные преимущества медной металлизации: низкое удельное сопротивление 1,7 мкОм·см (у алюминия 2,8 мкОм·см), высокая устойчивость к электромиграции [2].

Основной проблемой перехода к медным межсоединениям в условиях миниатюризации полупроводниковых изделий, в частности, СБИС с элементами субмикронных размеров, является большая диффузионная подвижность меди в различных материалах, включая SiO₂.

Данный фактор вынуждает окружать медную металлизацию со всех сторон диффузионно-барьерным слоем (ДБС) [4]–[5]. Для металлизации с проводящим слоем на основе меди рекомендованы ДБС в виде TiN, Ti-Si-N, TaN, Ta-Si-N, TiW, W₂N, и др. Свойства данных ДБС достаточно подробно рассмотрены в работе [4].

При решении вопроса о надежности как сварных, так и паяных соединений, наряду с выбором оптимальных способов и режимов монтажа, необходимо учитывать состав и свойства покрытий. Анализ покрытий контактных площадок кристаллов и траверс корпусов полупроводниковых, в том числе 3D-изделий показал, что для формирования внутренних соединений необходимо, в первую очередь, рассматривать следующие покрытия: на кристаллах – алюминиевую и медную металлизации, а на траверсах корпусов – золото, серебро, никель и его сплавы, гальваническое алюминирование [6].

Целью данной статьи является исследование свойств медной металлизации токоведущих слоев (ТВС) кремниевых кристаллов. При этом медь напылялась на адгезионный слой ванадия, а для защиты меди от окисления на неё наносилась плёнка никеля. При использовании медных ТВС наличие ДБС требуется не только в области контактного окна, но и на маскирующем SiO₂, поскольку медь быстро диффундирует через него даже при низких температурах [3], [7].

ПОДГОТОВКА ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Технологический маршрут подготовки образцов с медной металлизацией для исследований включает следующие операции: изготовление Si пластин размером 48x60 мм; окисление пластин по существующей технологии; нанесение адгезионного слоя ванадия толщиной 0,3 мкм; нанесение медной металлизации толщиной 1,2 мкм; нанесение защитного слоя Ni толщиной 0,3 мкм; отжиг пластин в H₂ при T=400 °C; разделение пластины на кристаллы.

С целью упрощения технологии изготовления образцов для исследований медной металлизации в качестве адгезионного слоя на SiO₂ напылялась пленка ванадия. Для защиты медной металлизации от окисления на неё наносят защитное покрытие золотом, серебром или никелем. Анализ данных покрытий показал, что наиболее перспективным как с экономической, так и с технологической стороны является никелевое покрытие.

ПОВЕРХНОСТНОЕ И УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ МЕДНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

Известно большое число методов измерения поверхностного $R_{\text{пов}}$ и удельного ρ сопротивлений [8]. По взаимодействию измеряемых образцов и средств измерения эти методы подразделяются на бесконтактные и контактные.

К контактным методам относятся четырехзондовый, трехзондовый, двухзондовый методы и метод сопротивления растекания. В электронной промышленности для измерения поверхностного сопротивления пленок широко используется четырехзондовый метод. Данный метод реализуется подачей электрического сигнала и снятием ответной реакции с пленки иглообразными зондами, которые обеспечивают контакт с пленкой. Условием его применимости с точки зрения формы образца является наличие плоской поверхности, линейные размеры которой превосходят линейные размеры системы зондов.

При использовании прибора для измерения сопротивлений пленок четырёхзондовым методом необходимо обращать внимание на давление зондов на исследуемую пленку, т.к. проколы пленок искажают результаты измерений. Поэтому используют зонды из сверхупругих сплавов с соответствующим закруглением концов. Перспективным способом контроля сопротивления является применение в качестве зондов золотой проволоки с шариком на конце.

Зная $R_{\text{пов}}$, удельное сопротивление пленок вычисляют по формуле

$$\rho = R_{\text{пов}}d, \text{ Ом} \cdot \text{см},$$

где d — толщина пленки.

Исследования поверхностного сопротивления медной металлизации с Ni покрытием проводились на установке ИУС-3. Результаты измерений представлены на рис. 1.



Рис. 1. Интегральное распределение поверхностного сопротивления медной металлизации на кристалле.

Величина поверхностного сопротивления после напыления изменяется от 0,009 Ом/кв до 0,013 Ом/кв. Среднее значение поверхностного сопротивления после напыления $R_{\text{пов}} = 0,011$ Ом/кв.

После отжига значения поверхностного сопротивления изменяются от 0,012 Ом/кв до 0,014 Ом/кв, при этом среднее значение $R_{\text{пов}} = 0,0131$ Ом/кв.

Таким образом, отжиг приводит к увеличению среднего значения $R_{\text{пов}}$ и к уменьшению разбросов этих значений.

Удельное сопротивление медной металлизации рассчитывалось по вышеприведенной формуле. Толщина d металлизации Cu-Ni составляла 1,5 мкм (1,2 мкм Cu и 0,3 мкм Ni). Значения удельного сопротивления пленок незначительно отличаются от значений удельного сопротивления чистой меди ($\rho_{\text{Cu}} = 1,72$ мкОм•см) (рис. 2). Среднее значение удельного сопротивления после напыления $\rho = 1,68$ мкОм•см, а после отжига $\rho = 1,97$ мкОм•см. Как и в случае с $R_{\text{пов}}$, отжиг приводит к увеличению среднего значения ρ и к уменьшению разбросов этих значений.

Результаты исследований показали, что значение удельного сопротивления на образцах после отжига при температуре 400 °С несколько выше, чем на образцах после напыления. Это объясняется тем, что после отжига в металлизации происходит изменение структуры, увеличение размеров зерен, рекристаллизация и др. процессы.

ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА МЕДНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

В производстве полупроводниковых изделий присоединение внутренних выводов к контактным площадкам кристалла и траверсам корпуса осуществляется после напайки кристаллов. Пайку кристаллов проводят в следующих средах: вакууме, водороде и формирующем газе (85 % N₂ и 15 % H₂). Температура нагрева при пайке зависит от размеров кристалла и применяемого припоя.

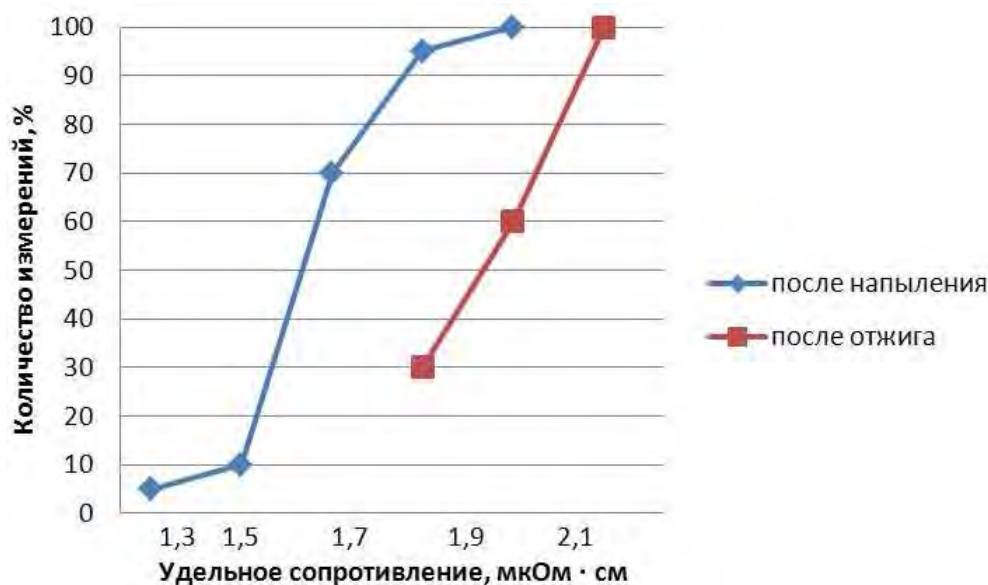


Рис. 2. Интегральное распределение удельного сопротивления медной металлизации на кристалле.

Поэтому представляет интерес исследование состояния поверхностного слоя металлизации Cu-Ni после напыления и после отжига образцов при температуре 400 °С в H₂. В данном разделе проведен качественный и количественный анализ химического состава металлизации Cu-Ni. Исследования химического состава поверхностного слоя Cu-Ni покрытий проводились на электронном микроанализаторе типа JED-2300 Analysis Station.

Результаты анализа представлены на рис. 3. Установлен химический состав поверхностного слоя Cu-Ni после напыления (71,05 % Cu и 28,95 % Ni), а после отжига, соответственно (72,02 % Cu и 27,98 % Ni).

При нагреве образцов с покрытиями Cu-Ni до температуры пайки кристаллов, происходит диффузия меди через никелевое покрытие. Медь и никель обладают неограниченной растворимостью, поэтому при нагреве покрытий при температуре пайки кристаллов происходит взаимное растворение никеля и меди.

В процессе нагрева протекают процессы диффузии, происходит количественное изменение состава покрытий, установленные количественным химическим анализом (рис. 3), но фазовый состав покрытий, по-видимому, не изменяется.

Результаты исследования поверхности образцов сканирующей зондовой микроскопией (СЗМ) представлены на рис. 4. Сканирование проводилось полуконтактной методикой кантилевером NSG10 на СЗМ Интегра “Прима” (г. Зеленоград). Площадь сканирования задавали 10×10 мкм (рис. 4 а, б). Из рис. 4 видно, что образец (после напыления) характеризуется величиной неоднородности поверхности до 85 нм, что почти в 2 раза меньше, чем у образца после отжига (около 130 нм).

ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОТВЕРДОСТИ МЕДНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ НА КРИСТАЛЛЕ МЕТОДОМ КНУПА

Важнейшим свойством, влияющим на качество операции присоединения внутренних выводов, является твердость покрытий. Поэтому именно твердость была выбрана для сравнительного анализа покрытий кристаллов Cu-Ni после напыления и после отжига образцов.

Число микротвердости определяют делением приложенной к алмазному наконечнику нор-

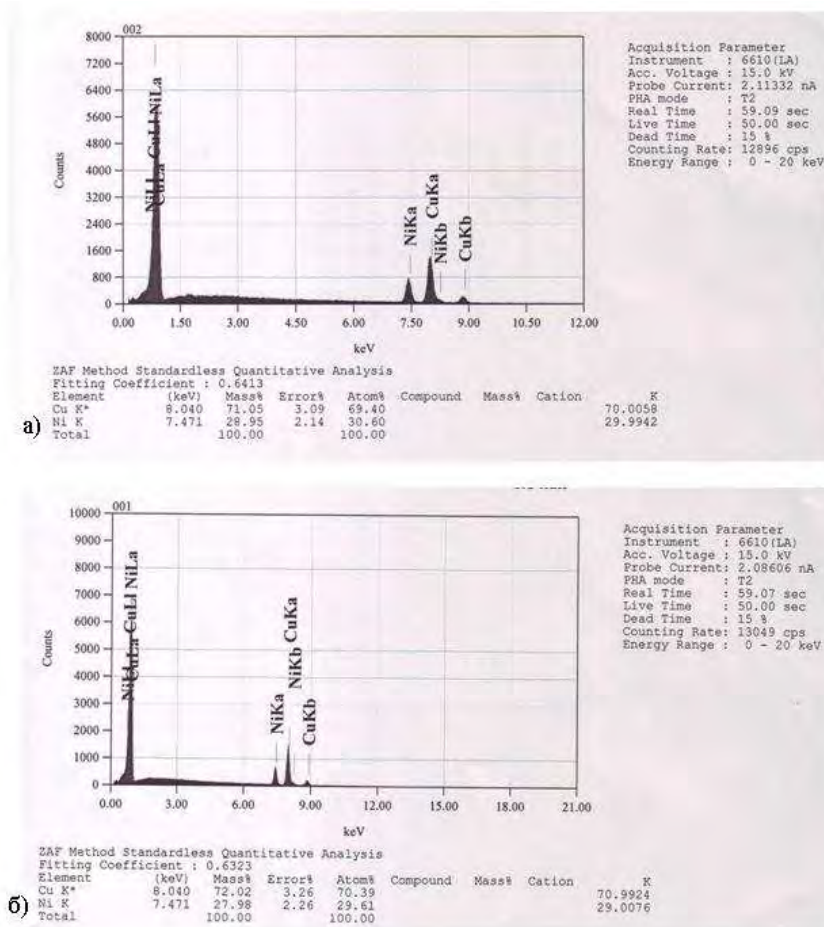


Рис. 3. Рентгеноспектральный микроанализ металлизации Cu-Ni: а – после напыления; б – после отжига в H₂ при T=400 °C (на режимах напайки кристалла)

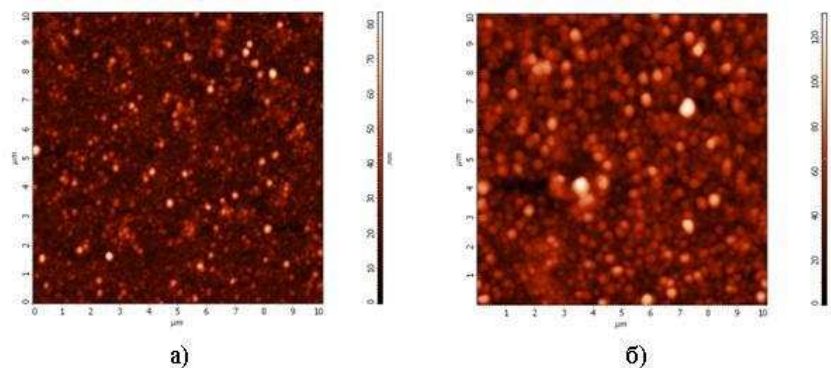


Рис. 4. СЗМ изображение поверхности образцов: а) - после напыления; б) - после отжига

мальной нагрузки на условную площадь боковой поверхности отпечатка. Измерения микротвердости при малой нагрузке проводят на стандартном приборе для испытания по Виккерсу. Более точные измерения микротвердости определяют по методу Кнупа.

При определении микротвердости по Кнупу в качестве индентора используют алмазную пирамиду с ромбическим основанием: угол пересечения выступающих продольных ребер этой пирамиды составляет $172^\circ 30'$, а поперечных 130° .

Благодаря этому получается отпечаток, продольная диагональ которого примерно в 7 раз больше, чем поперечная. Продольную диагональ можно измерить относительно точно. В отличие от значений микротвердости по Виккерсу величина микротвердости по Кнупу рассчитывается как соотношение нагрузки к проекции поверхности отпечатка.

Глубина вдавливания очень маленькая ($\sim 1/30$ продольной диагонали d). Благодаря такой глубине вдавливания метод определения твердости по Кнупу наиболее пригоден для измерения тонких слоев.

Нагружение следует проводить плавно, без толчков; скорость опускания алмазного наконечника не должна влиять на размеры отпечатка; продолжительность выдержки не менее 3 с.

В нашем эксперименте проводились исследования микротвердости по методу Кнупа на двух образцах (после напыления и после отжига при температуре 400°C). На каждом образце было проведено по 13 контрольных замеров. По средним значениям микротвердости было построено интегральное распределение микротвердости металлизации Cu-Ni на образцах после напыления и после отжига при температуре 400°C (рис. 5).

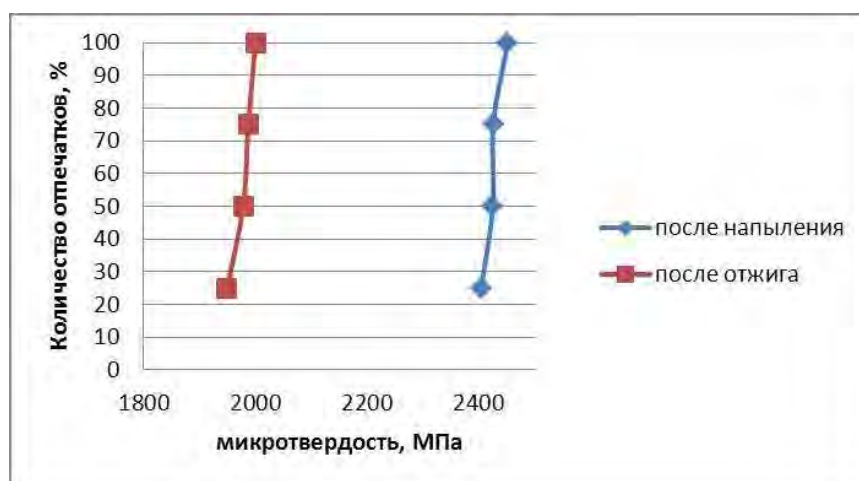


Рис. 5. Интегральное распределение микротвердости металлизации Cu-Ni на образцах после напыления и после отжига при температуре 400°C

Покрyтия после напыления характеризуются мелкими неоднородностями (зернами) и обладают более высокой твердостью, чем крупнозернистые. Повышенная твердость в данном случае связана с увеличением свободной энергии, характерной для более мелких кристаллов.

После отжига покрyтия обладают более низкой твердостью, чем расположенные ближе к подложке мелкозернистые слои. В процессе отжига в покрyтии Cu-Ni происходит рекристаллизация, увеличиваются размеры зерен и шероховатость поверхности.

Ранее проведенные исследования [9] формирования соединений ультразвуковой сваркой (УЗС) алюминиевой проволокой диаметром 50 мкм к контактными площадкам кристаллов с Cu-Ni металлизацией показали высокое качество контактных соединений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований Cu металлизации, покрытой защитной Ni пленкой, показали следующее:

1. Удельное сопротивление на образцах после отжига в H_2 при температуре $400\text{ }^\circ\text{C}$ (режим напайки кристаллов к корпусам) несколько выше, чем на образцах после напыления. Это связано с изменением структуры, увеличением размеров зерен, рекристаллизацией и др. процессами.

2. Установлено незначительное изменение химического состава поверхностного слоя Cu-Ni после напыления (71,05 % Cu и 28,95 % Ni), а после отжига соответственно (72,02 % Cu и 27,98 % Ni).

На поверхности Cu-Ni металлизации наличие Si из пластины и маскирующего диэлектрика SiO_2 даже при температуре отжига образцов $400\text{ }^\circ\text{C}$ не обнаружено.

3. Величина поверхностных неоднородностей у образцов до отжига составляет величины в пределах 85 нм, а после отжига – 130 нм.

4. Исследованиями микротвердости по методу Кнупа установлено, что металлизация с мелкими зёрнами (до отжига) обладает более высокой микротвердостью, чем крупнозернистая (после отжига). Некоторое снижение микротвердости покрытий Cu-Ni практически не влияет на качество микросварных соединений при УЗС алюминиевой проволокой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Peter Clarke. The transition to copper interconnect for memory devices / Peter Clarke // Electronic Engineering Times – 16.04.2010 [Электронный ресурс]. URL: http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1173558. (дата обращения: 06.09.2015).

2. Валентинова М. Воспоминание о будущем. Возврат к меди / М. Валентинова // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука. Технология. Бизнес. – 1999. – № 4. – С. 38–41.

3. Способ изготовления медной многоуровневой металлизации СБИС / Г.Я. Красников, А.С. Валеев, Н.А. Шелепин и др. // Патент 2420827 RU.H01L 21/283. Заявл. 11.01.2010. Опубл. 10.06.2011. Бюл. №16

4. Исследование барьерных свойств сплава Ta-W-N в составе многослойной системы металлизации ИС / А.Г. Климовицкий, А.И. Мочалов, Д.Г. Громов и др. // Известия вузов ЭЛЕКТРОНИКА. – 2003. – № 5. – С. 3–8.

5. Материалы для металлизации кремниевых СБИС / А.Г. Климовицкий, А.И. Мочалов, В.Л. Евдокимов и др. // Электронная промышленность. – 2002. – № 1. – С. 60–66.

6. Покрытия контактных площадок кристаллов и траверс корпусов для микросварки внутренних выводов 3D изделий / В.В. Зенин, А.А. Стоянов, С.В. Петров, Б.А. Спиридонов // Микроэлектроника. – 2013. – Т. 42, № 5. – С. 361–374.

7. Громов Д.Г. Металлизация ультрабольших интегральных схем / А.И. Мочалов, А.Д. Сулимин, В.И. Шевяков. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 277 с.

8. Измерения и контроль в микроэлектронике: Учеб. пособие для вузов по специальностям электрон. техники / Н.Д. Дубовой [и др.]; под ред. А.А. Сазонова. – М.: Высшая школа, 1984. – 367 с.

9. Сборка изделий микроэлектроники с использованием металлизации и проволоки из меди / А.А. Стоянов, В.В. Зенин, Е.П. Новокрещенова, М.А. Грибанов // Вестник ВГТУ. – 2014. – Т. 10, № 5–1. – С. 98–104.

REFERENCES

1. Peter Clarke. The transition to copper interconnect for memory devices / Peter Clarke // Electronic Engineering Times – 16.04.2010. Available at:

http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1173558. (Accessed: 6 september 2015).

2. Valentinova M. Remembering the future. Return to Copper. [Valentinova M. Vospominanie o budushchem. Vozvrat k medi]. *ELEKTRONIKA: Nauka. Tehnologiya. Biznes — Elektronika: Science, Technology, Business*, 1999, no. 4, pp. 38–41.

3. Krasnikov G.Ya., Valeev A.S., Shelepin N.A., Gushchin O.P., Vorotilov K.A., Vasil'ev V.A., Averkin S.N. Manufacturing method of multi-level copper metallization of VLSIC. [Krasnikov G.Ya., Valeev A.S., Shelepin N.A., Gushchin O.P., Vorotilov K.A., Vasil'ev V.A., Averkin S.N. Sposob izgotovleniya mednoy mnogourovnevnoy metallizatsii SBIS]. Patent 2420827 RU.H01L 21/283. Date of filing: 11.01.2010. Date of publication: 10.06.2011. Bull. no. 16.

4. Klimovitskiy A.G., Mochalov A.I., Gromov D.G., Leonova E.V., Mochalov Z.A. Study the barrier properties of the alloy Ta-W-N in the composition of the multilayer metallization system IC. [Klimovitskiy A.G., Mochalov A.I., Gromov D.G., Leonova E.V., Mochalov Z.A. Issledovanie bar'ernykh svoystv splava Ta-W-N v sostave mnogosloynnoy sistemy metallizatsii IS]. *Izvestiya vuzov ELEKTRONIKA — Proceedings of universities. Electronics*, 2003, no. 5, pp. 3–8.

5. Gromov D.G., Klimovitskiy A.G., Mochalov A.I., Evdokimov V.L., Sulimin A.D., Lichmanov I.O. Materials for the metallization of silicon VLSI. [Gromov D.G., Klimovitskiy A.G., Mochalov A.I., Evdokimov V.L., Sulimin A.D., Lichmanov I.O. Materialy dlya metallizatsii kremnievykh SBIS]. *Elektronnaya promyshlennost' — Electronic Industry*, 2002, no. 1, pp. 60–66.

6. Zenin V.V., Stoyanov A.A., Petrov S.V., Spiridonov B.A. Coatings of contact areas of crystals and the traverse of packages for microwelding of internal outputs of 3D wares. [Zenin V.V., Stoyanov A.A., Petrov S.V., Spiridonov B.A. Pokrytiya kontaktnykh ploshhadok kristallov i travers korpusov dlya mikrosvarki vnutrennix vyvodov 3D izdelij]. *Mikroe'lektronika — Russian microelectronics*, 2013, vol. 42, iss. 5, pp. 361–374.

7. Gromov D.G., Mochalov A.I., Sulimin A.D., Shevyakov V.I. Metallization of ultra large-scale integrated circuits. [Gromov D.G., Mochalov A.I., Sulimin A.D., Shevyakov V.I. Metallizatsiya ul'trabol'shikh integral'nykh skhem]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2009, 277 p.

8. Measurements and control in microelectronics / N.D. Dubovoy [et al.], Sazonov A.A. (ed.). [Izmereniya i kontrol' v mikroelektronike / N.D. Dubovoy [i dr.]; pod red. A.A. Sazonova]. Moscow: Vysshaya shkola, 1984, 367 p.

9. Stoyanov A.A., Zenin V.V., Novokreshchenova E.P., Griбанov M.A. Assembly of microelectronic wares with the use of copper metallization and copper wires. [Stoyanov A.A., Zenin V.V., Novokreshchenova E.P., Griбанov M.A. Sborka izdeliy mikroelektroniki s ispol'zovaniem metallizatsii i provoloki iz medi]. *Vestnik VGTU — The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2014, vol. 10, no. 5-1, pp. 98–104.

Стоянов Андрей Анатольевич, начальник
технологического отдела, ОАО “Научно-
исследовательский институт электрон-
ной техники”, г. Воронеж, Российская Фе-
дерация
E-mail: p21stoa@niiet.ru

Stoyanov Andrey Anatol'evich, Head of
Production Department of JSC Scientific-
Research Institute of Electronic Technology,
Voronezh, Russian Federation
E-mail: p21stoa@niiet.ru

Бормонтов Александр Евгеньевич,
инженер-технолог ОАО “Научно-
исследовательский институт элек-
тронной техники”, кандидат физико-
математических наук, г. Воронеж,
Российская Федерация
E-mail: bormontovae83@mail.ru

Bormontov Aleksandr Eugen'evich, Production
engineer of JSC Scientific-Research Institute
of Electronic Technology, Candidate of
Physical and Mathematical Sciences,
Voronezh, Russian Federation
E-mail: bormontovae83@mail.ru

*Рембеза Станислав Иванович, заведующий кафедрой полупроводниковой электроники и наноэлектроники Воронежского государственного технического университета, доктор физико-математических наук, профессор, г. Воронеж, Российская Федерация
E-mail: vstu-ppе@mail.ru*

*Rembeza Stanislav Ivanovich, Head of the Department of Semiconductor Electronics and Nanoelectronics, Voronezh State Technical University, Doctor of Physical and Mathematical Science, Professor, Voronezh, Russian Federation
E-mail: vstu-ppе@mail.ru*

*Зенин Виктор Васильевич, профессор кафедры полупроводниковой электроники и наноэлектроники Воронежского государственного технического университета, доктор технических наук, профессор, г. Воронеж, Российская Федерация
E-mail: zenvik@bk.ru*

*Zenin Viktor Vasil'evich, Professor, Department of Semiconductor Electronics and Nanoelectronics, Voronezh State Technical University, Doctor of Technical Science, Professor, Voronezh, Russian Federation
E-mail: zenvik@bk.ru*