

МИКРОСВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ЗОЛОТОЙ ПРОВОЛОКИ С Cu-Ni МЕТАЛЛИЗАЦИЕЙ КРИСТАЛЛОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

А. И. Землянский¹, А. Е. Бормонтов¹, С. В. Родивилов¹,
Д. И. Бокарев², В. В. Зенин²

¹ – АО «Научно-исследовательский институт электронной техники»;

² – Воронежский государственный технический университет

Поступила в редакцию 11.07.2018 г.

Аннотация. Приведены особенности использования медной металлизации с никелевым соединительным слоем на контактных площадках кристаллов кремниевых полупроводниковых изделий (ППИ). Рассмотрена технология напыления пленок ванадия, меди и никеля в одном технологическом цикле при температуре подложки 320° С, исключающая последующий отжиг. При этом Cu диффундирует через Ni слой в процессе формирования металлизации. Проведены исследования микротвердости и химического состава металлизации Cu-Ni после напыления. Анализ способов формирования соединений золотой проволоки диаметром 30 мкм к контактным площадкам кристаллов с Cu-Ni металлизацией показал, что оптимальным способом является сварка «расщепленным» электродом. Экспериментально доказано, что использование данного способа сварки обеспечивает качественные соединения.

Ключевые слова: кремниевые кристаллы, контактные площадки, медная металлизация, сварка золотой проволоки.

MICROWELDED INTERCONNECTIONS BETWEEN GOLDEN WIRE AND Cu-Ni METALLIZATION OF CRYSTALS OF SEMICONDUCTOR PRODUCTS

A. I. Zemlyanskiy, A. E. Bormontov, S. V. Rodivilov,
D. I. Bokarev, V. V. Zenin

Abstract. Features of the use of copper metallization with a nickel connecting layer on the contact pads of crystals of silicon semiconductor products are given. The technology of sputtering of vanadium, copper and nickel films in one technological cycle is considered at a substrate temperature of 320° C, which excludes subsequent annealing. In this case, Cu diffuses through the Ni layer during the metallization formation. Investigations of the microhardness and chemical composition of Cu-Ni metallization after sputtering were carried out. Analysis of the methods of forming connections of gold wire with a diameter of 30 μm to contact pads of crystals with Cu-Ni metallization showed that the optimal method is a welding with a split electrode. It has been experimentally proven that the use of this welding method provides a quality connections.

Keywords: silicon crystals, contact pads, copper metallization, welding of gold wire.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с уменьшением размеров элементов ППИ большое внимание уделяется проблеме задержки сигналов в соединительных линиях. В связи с этим появилась необходимость замены алюминиевой металлизации на медную в производстве современных интегральных схем, в первую очередь, микропроцессоров с элементами субмикронных размеров [1].

Преимущества меди в качестве материала межсоединений перед алюминием: более низкое удельное сопротивление, что, по оценкам специалистов, дает до 40 % выигрыш в величине РС-задержки; высокая термическая стабильность и существенно меньшая склонность к электромиграции [2].

Однако вместе с указанными преимуществами медь имеет и нежелательные свойства, так как является быстродиффундирующей примесью. Медь быстро диффундирует во многие материалы, включая SiO_2 .

Целью данной статьи является исследование медной металлизации с никелевым соединительным слоем (Cu-Ni) на кристаллах ППИ. При этом медь напылялась на адгезионный слой ванадия, а в качестве соединительного слоя на неё наносилась пленка никеля. Основным отличием от работы [2] являлось то, что напыление пленок осуществлялось при температуре 320°C , а соединение с Cu-Ni металлизацией формировалось золотой проволокой сваркой "расщепленным" электродом.

МЕДНАЯ МЕТАЛЛИЗАЦИЯ С НИКЕЛЕВЫМ СОЕДИНИТЕЛЬНЫМ СЛОЕМ КОНТАКТНЫХ ПЛОЩАДОК КРИСТАЛЛОВ

Переход к медным межсоединениям в условиях миниатюризации ППИ, в частности, в сверхбольших интегральных схемах (СВИС) с элементами субмикронных размеров, затруднен из-за диффузионной подвижности Cu в различных материалах. Этот фактор вынуждает окружать медные межсоединения со всех сторон диффузионно-барьерным слоем (ДБС).

В случае применения медных токоведущих слоев (ТВС) наличие ДБС требуется не только в области контактного окна, но и на маскирующем SiO_2 , поскольку медь быстро диффундирует через него даже при низких температурах. Медь на воздухе покрывается оксидной пленкой, которая существенно влияет на качество сборочных операций при формировании внутренних соединений к кристаллу. Поэтому после нанесения медной металлизации ее защищают покрытием (соединительным слоем) определенной толщины. В качестве материалов соединительного слоя можно использовать золото, серебро или никель. Наиболее перспективным как с экономической, так и с технологической стороны является никелевое покрытие.

В статье [2] проведены исследования свойств медной металлизации ТВС кремниевых кристаллов. Основным недостатком формирования сварных соединений к никелевому соединительному слою на контактных площадках кристаллов с медными соединениями является использование алюминиевой проволоки.

Внутренние соединения в ППИ представляют собой перемижку между контактной площадкой кристалла и траверсой корпуса. Применение алюминиевой проволоки приводит к снижению надежности ППИ при использовании корпусов с золотым покрытием. Соединения Al-Au являются термодинамически неустойчивыми из-за образования в контактах этих металлов низкотемпературных интерметаллических соединений.

Последние появляются уже в процессе формирования сварного соединения как при ультразвуковой сварке (УЗС), так и при термозвуковой сварке (ТЗС) и продолжают расти при повышенной температуре в процессе технологических обработок и эксплуатации приборов. Основным механизмом отказа микросварных соединений Al-Au является нарушение механической целостности данных соединений, что обусловлено формированием пустот и микротрещин

в контакте вследствие эффекта Киркендалла.

В статье [2] экспериментально установлены оптимальные режимы УЗС алюминиевой проволоки диаметром 50 мкм с никелевым соединительным слоем. Прочность соединений на отрыв стабильная и изменяется от 20 до 27 сН, при этом разрушение на всех образцах происходит по “шейке” (участку перехода проволоки в сварное соединение). Это связано с состоянием поверхностных слоев металлизации Cu-Ni на кристалле. Органические загрязнения и естественные оксидные пленки на поверхности соединяемых деталей как при пайке, так и сварке существенно влияют на процесс образования и развития физического контакта в зоне соединения.

Одним из методов подготовки поверхности Cu-Ni металлизации к микросварке выводов является получение на контактной площадке кристалла микрорельефа с малой высотой микронеровностей. Известно, что структура и морфология поверхности исходного кристалла и его металлизация претерпевают существенные изменения на разных технологических операциях изготовления кристаллов.

Разработан [3] способ приварки золотой проволоки к серебряному соединительному слою на контактных площадках кристаллов с медными соединениями. Известно, что основной трудностью сборочных операций по серебряному покрытию является наличие сульфидной пленки Ag_2S на поверхности. Сборка ППИ по серебряным покрытиям требует тщательной подготовки соединяемых деталей.

Образование Ag_2S сопровождается потемнением поверхности серебра и увеличением электрического сопротивления. При низких температурах пленки Ag_2S фактически становятся электроизоляционными. Кроме того, соединения системы золото-серебро склонны к электромиграции из-за неограниченной взаимной растворимости. Это приводит к нарушению соединений золотых проводников с серебряным покрытием вследствие полного растворения серебра в контакте. Более того, на серебряном покрытии при определенных условиях (повышенная влажность и нагрев) вырастают тонкие копьевидные кристаллы (“усы”), способные приводить к короткому замыканию близлежащих цепей или размыканию цепей при пониженных температурах. Данные факторы снижают качество приварки золотой проволоки к серебряному соединительному слою на контактных площадках кристаллов с медными соединениями и надежность ППИ при эксплуатации. Кроме того, использование гальванического серебрения для формирования соединительного слоя требует последующей отмывки, что повышает себестоимость производства ППИ.

С целью повышения качества соединений золотую проволоку целесообразно приваривать к Ni соединительному слою. Сварка золотой проволоки к Ni-соединительному слою на контактных площадках кристаллов с медными соединениями реализуется следующим образом. На кремниевых пластинах с кристаллами по известной полупроводниковой технологии формируют пленку SiO_2 . Затем на пленку SiO_2 напыляют пленки ванадия (адгезионный слой), меди и никеля. В отличие от исследований, проведенных в работе [2], напыление пленок ванадия толщиной 0,5 мкм (3 минуты), меди толщиной 1,5 мкм (40 минут) и никеля толщиной 0,3 мкм (3 минуты) осуществляли в одном технологическом цикле при температуре пластины 320 °С с целью исключения последующего отжига. При этом диффузия меди через никелевое покрытие происходит в процессе формирования металлизации. Рентгеноспектральный анализ химического состава металлизации Cu-Ni после напыления при температуре 320 °С показал следующие результаты: Cu 78,207 и Ni 21,793 (вес. %).

Следует отметить, что золото образует непрерывный ряд твердых растворов с Ni и Cu в виде двойных систем. Например, при взаимодействии золота с Ni образуются фазы Au_3Ni , $AuNi$ и $AuNi_3$. При этом скорость диффузии Ni в золото гораздо ниже, чем у других переходных металлов подгруппы железа.

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ МЕДНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ С НИКЕЛЕВЫМ СОЕДИНИТЕЛЬНЫМ СЛОЕМ

Микротвердость тонких покрытий измеряли по методу Кнупа. Этот метод измерения подразумевает использование в качестве индентера четырехгранной пирамиды с ромбическим основанием. Глубина отпечатка при таком исследовании получается около 1/30 длины диагонали.

Сущность метода заключается во вдавливании в поверхность испытуемого образца под действием приложенной нагрузки (статической силы) F алмазного наконечника в виде пирамиды с углами α и β между противоположными сторонами равными $172,5^\circ$ и 130° соответственно (рис. 1) и измерении длины большей диагонали l отпечатка, оставшегося на поверхности образца после ее снятия [4].

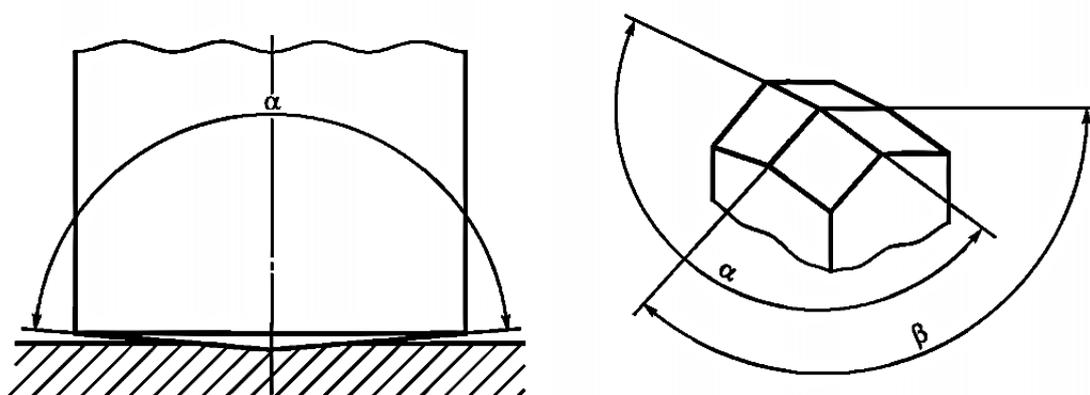


Рис. 1. Принцип измерения микротвердости по Кнупу и геометрия индентера.

Значение микротвердости по Кнупу определяется по формуле

$$H_k = 1,451 \cdot F/l^2,$$

где F — сила воздействия, H ; l — длина большей диагонали отпечатка, см.

Чем меньше толщина исследуемого покрытия, тем меньше должна быть используемая нагрузка F . Величина нагрузки выбирается такой, при которой материал основы не влияет на результаты измерений [5].

Исследование микротвердости системы Cu-Ni проводилось на цифровом твердомере KB 30S по методу Кнупа с объективом 20x и программным обеспечением HardWin XL. После индентирования цифровое изображение отпечатка, полученное камерой, увеличивается объективом и отображается на мониторе. Измерение длин диагоналей и расчет единиц твердости производится автоматически. Значения твердости выводятся на дисплей, а цифровое изображение отпечатков сохраняется на жестком диске.

Измерение микротвердости проводили путем вдавливания алмазной пирамидки Кнупа с нагрузкой 0,1 Н (0,01 кгс) и выдержкой в течение 10 с. По рассчитанным значениям микротвердости построены интегральные распределения значений микротвердости исследуемой металлизации (рис. 2).

Значения микротвердости металлизации Cu-Ni после напыления при температуре 320°C лежат в пределах 2069 – 2873 МПа.

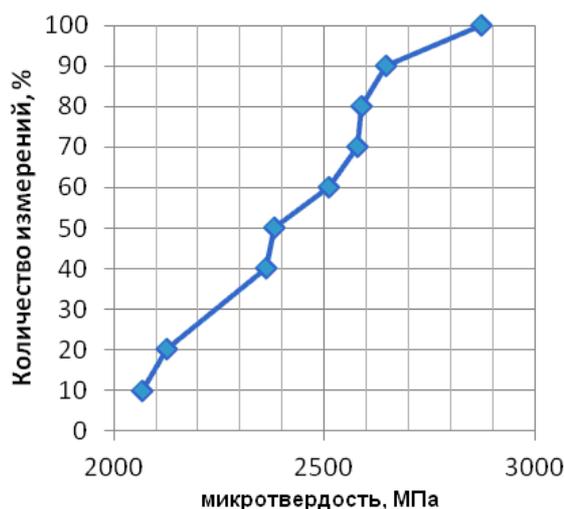


Рис. 2. Интегральные распределения значений микротвердости металлизации Cu-Ni после напыления при температуре 320 °С.

ВЫБОР РЕЖИМОВ ПРИВАРКИ Au ПРОВОЛОКИ К МЕТАЛЛИЗАЦИИ Cu-Ni РАСЩЕПЛЕННЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

Анализ существующих методов формирования соединений проволочными выводами в производстве ППИ показал, что наиболее широко используются следующие методы сварки: термокомпрессионная, термозвуковая, ультразвуковая, косвенным и импульсным нагревом и расщепленным электродом.

Соединения в ППИ и ИС должны удовлетворять следующим требованиям: прочность соединения должна быть близка к прочности соединяемых элементов микросхем; соединения должны иметь минимальное омическое сопротивление; основные параметры процесса соединения (температура нагрева, удельное давление и длительность выдержки) должны быть минимально возможными, с тем, чтобы не повреждались элементы схемы; выполнять соединения материалов разнообразных сочетаний и типоразмеров; после соединения не должно оставаться материалов, вызывающих коррозию; качество соединений должно контролироваться простыми и надежными методами [6].

На основе экспериментальных исследований установлено, что для формирования качественных соединений золотой проволоки с металлизацией Cu-Ni на кристаллах оптимальным способом является сварка “расщепленным” электродом [7].

При сварке “расщепленным” электродом учитывается особенность выполнения соединений в изделиях, которая заключается в одностороннем расположении электродов 1 и 2, объединенных в жесткую конструкцию. Между электродами размещается электроизоляционная (слюда или синтетический корунд) прокладка толщиной 0,03 – 0,22 мм. Если диаметр проволочного вывода составляет 0,03 – 0,15 мм, то ширина h и длина B торца электродов соответственно составляют 0,05 – 0,25 мм и 0,3 – 1,5 мм.

Сварка расщепленным электродом характеризуется следующими параметрами: время импульса (τ , мс), мощность генератора (N , в условных единицах), давление на инструмент (P , гс).

Разварка золотой проволоки диаметром 30 мкм проводилась с использованием электрода типа ЭК2-30-140 (рис. 3). Материал электрода — сплав ВК-8. Выбор режимов сварки золотой проволоки расщепленным электродом проводился на образцах с металлизацией Cu-Ni после

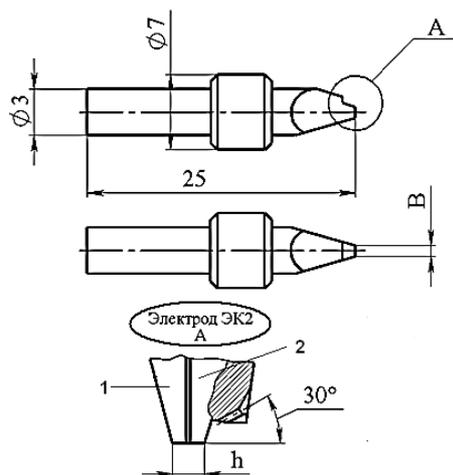


Рис. 3. Конструкции электродов для сварки

напыления при температуре 320 °С.

На каждом режиме разваривалось по 15 проволочных перемычек. Оптимальные режимы сварки приведены в табл. 1.

Таблица 1. Режимы сварки и прочность соединений Au/Cu-Ni

Параметр	После напыления при температуре 320 °С
Время импульса (τ , мс)	30
Мощность генератора (N, в условных единицах)	100
Давление на инструмент (P, гс)	85
Прочность соединения, сН	10,3-13,05

Оценка прочности проволочных соединений осуществлялась на установке контроля Delvotec 5600С.

Внешний вид сварных соединений и характер разрушения при оценке прочности на обрыв на исследуемых образцах с Cu-Ni металлизацией приведены на рис. 4, а интегральное распределение значений прочности — на рис. 5.

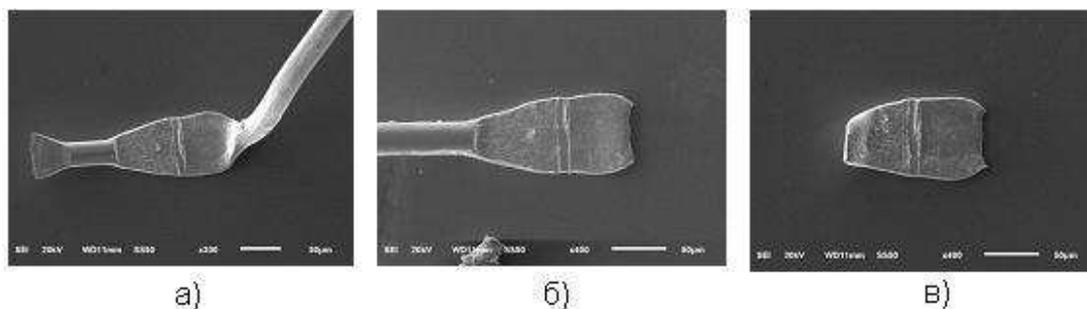


Рис. 4. Сварные соединения Au проволоки диаметром 30 мкм с Cu-Ni металлизацией после напыления, выполненных сваркой расщепленным электродом: а) — первая сварная точка перемычки; б) — вторая сварная точка перемычки; в) — характер разрушения при оценке прочности

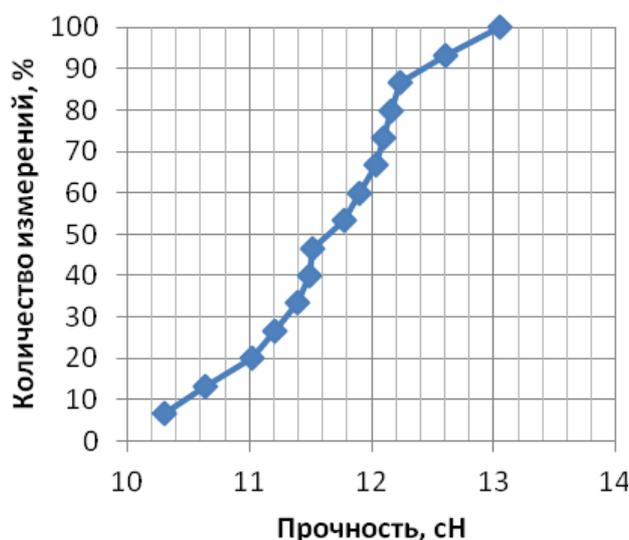


Рис. 5. Интегральное распределение значений прочности соединений Au проволоки диаметром 30 мкм с Cu-Ni металлизацией, выполненных сваркой расщепленным электродом

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

1. Показано, что напыление пленок ванадия, меди и никеля в одном технологическом цикле при температуре пластины 320 °С позволяет исключить последующий отжиг металлизации Cu-Ni.

2. Представлены результаты исследований микротвердости и химического состава металлизации Cu-Ni после напыления при температуре 320 °С. Рентгеноспектральный анализ химического состава металлизации Cu-Ni показал следующие результаты: 78,207 Cu и 21,793 Ni (вес. %). На поверхности Cu-Ni металлизации наличие Si из пластины Si и маскирующего диэлектрика SiO₂ при температуре напыления пленок 320 °С не обнаружено. Значения микротвердости металлизации Cu-Ni лежат в пределах 2069 – 2873 МПа, что обеспечивает заданную прочность соединений “провода-пленка”.

3. Выбраны оптимальный способ и режимы формирования соединений золотой проволоки диаметром 30 мкм к контактным площадкам кристаллов с Cu металлизацией, покрытой Ni защитной пленкой. Экспериментально доказано, что использование способа сварки “расщепленным” электродом позволяет получать качественные контакты прочностью от 10,3 до 13,05 сН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. Исследования медной металлизации контактных площадок кремниевых кристаллов / А. А. Стоянов, А. Е. Бормонтов, С. И. Рембеза, В. В. Зенин // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Физика, математика. — 2015. — № 3. — С. 49–57.

3. Chuang, C. L. Thermosonic bonding of gold wire onto silver bonding layer on the bond pads of chips with copper interconnections / C. L. Chuang, J. N. Aoh // Journal of Electronic Materials. — 2006. — V. 35, № 9. — P. 1693–1700.

4. Материалы металлические. Определение твердости по Кнупу. Часть 1. Метод испытания: ГОСТ Р ИСО 4545–1–2015. — [Введен в действие от 2015–04–09]. — М. : Стандартинформ,

2015. — 15 с. — (Национальный стандарт Российской Федерации).

5. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников: ГОСТ 9450–76. — [Введен в действие от 1976–01–09]. — М. : Издательство стандартов, 1976. — 35 с. — (Государственный стандарт союза ССР).

6. Зенин, В. В. Монтаж кристаллов и внутренних выводов в производстве полупроводниковых изделий / В. В. Зенин, В. А. Емельянов, В. Л. Ланин. — Минск : Интегралполиграф, 2015. — 380 с.

7. Землянский, А. И. Влияние конструктивно-технологических факторов на сборку приборов на основе широкозонных полупроводников (SiC и GaN): дис. канд. техн. наук: 05.27.01 / Александр Иванович Землянский. — Воронеж, ВГТУ, 2017. — 121 с.

REFERENCES

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

2. Stoyanov A.A., Bormontov A.E., Rembeza S.I., Zenin V.V. The research on the copper metallization of contact pads of silicon crystals. [Stoyanov A.A., Bormontov A.E., Rembeza S.I., Zenin V.V. Issledovaniya mednoy metallizatsii kontaktnykh ploshchadok kremniyevykh kristallov]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika. Matematika — Proceedings of Voronezh State University. Series: Physics. Mathematics*, 2015, no. 3, pp. 49–57.

3. Chuang C.L., Aoh J.N. Thermosonic bonding of gold wire onto silver bonding layer on the bond pads of chips with copper interconnections. *Journal of Electronic Materials*, 2006, vol. 35, no. 9, pp. 1693–1700.

4. Metallic materials. Knoop hardness test. Part 1. Test method. (2015). *HOST R ISO 4545-1-2015 from 9th April 2015*. Moscow: Standartinform Rossiiskoi Federatsii, 15 p.

5. Measurements microhardness by diamond instruments indentation. (1976). *HOST 9450–76 from 9th January 1976*. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 35 p.

6. Zenin V.V., Emelyanov V.A., Lanin V.L. Die bonding and internal interconnections mounting in the manufacture of semiconductor devices. [Zenin V.V., Emel'yanov V.A., Lanin V.L. Montazh kristallov i vnutrennikh vyvodov v proizvodstve poluprovodnikovykh izdeliy]. *Minsk: Integralpoligraf*, 2015, 380 p.

7. Zemlyanskiy A.I. The influence of constructive and technological factors on the assembly of devices based on wide-band semiconductors (SiC and GaN) [Zemlyanskiy A.I. Vliyaniye konstruktivno-tehnologicheskikh faktorov na sborku priborov na osnove shirokazonnykh poluprovodnikov (SiC i GaN)]. *Candidate's thesis: 05.27.01, Voronezh, VSTU*, 2017, 121 p.

Землянский Александр Иванович, начальник лаборатории АО «Научно-исследовательский институт электронной техники», кандидат технических наук, Воронеж, Российская Федерация
E-mail: a.zemlianskiy@mail.ru

Zemlyanskiy Aleksandr Ivanovich, Head of laboratory of JSC Scientific-Research Institute of Electronic Technology, Candidate of Technical Sciences, Voronezh, Russian Federation
E-mail: a.zemlianskiy@mail.ru

Бормонттов Александр Евгеньевич, инженер-технолог АО “Научно-исследовательский институт электронной техники”, кандидат физико-математических наук, 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

Родивилов Сергей Владимирович, инженер-технолог АО “Научно-исследовательский институт электронной техники”, Воронеж, Российская Федерация
E-mail: rodivilov@niiet.ru

Rodivilov Sergey Vladimirovich, Production engineer of JSC Scientific-Research Institute of Electronic Technology, Voronezh, Russian Federation
E-mail: rodivilov@niiet.ru

Бокарев Дмитрий Игоревич, доцент кафедры технологии сварочного производства и диагностики Воронежского государственного технического университета, кандидат технических наук, доцент, Воронеж, Российская Федерация
Тел.: +7(950)765-20-26

Bokarev Dmitriy Igorevich, Docent of the Department of Welding Technology and Diagnostics, Voronezh State Technical University, Candidate of Technical Sciences, Docent, Voronezh, Russian Federation
Tel.: +7(950)765-20-26

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

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