

УДК 621.382

DOI: 10.36845/2073-8250-2021-260-1-51-59

ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРНЫХ ПЛАТИНОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ТОНКОПЛЁНОЧНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ КРЕМНИЕВЫХ И КЕРАМИЧЕСКИХ ПОДЛОЖЕК

В.В. Побединский^{1,2}, Н.В. Rogozin¹, Т.Г. Меншикова³, Е.Н. Бормонттов²

¹АО «НИИЭТ», 394033 Воронеж, ул. Старых Большевиков, д.5

²ФГБОУ ВО «ВГУ», 394018 Воронеж, Университетская площадь, д.1

³ФГБОУ ВО «ВГТУ», 394026 Воронеж, Московский проспект, д.14

Исследованы сварные соединения термозвуковой микросварки платиновой проволоки модифицированным методом шарик-клин на платиновой и алюминиевой тонкоплёночной металлизации кремниевых и керамических подложек. Экспериментально получены результаты контроля качества сварных соединений на воздействие сдвигающей силы, измерены контактные сопротивления. Проведён отжиг сварных соединений платиновой проволоки с тонкоплёночной платиновой металлизацией и титановым подслоем на керамической подложке при температуре 900 °С в течение 60 минут в среде чистого кислорода.

Ключевые слова: платина, тонкоплёночная платиновая металлизация, термозвуковая микросварка, отжиг платины

Сведения об авторах: Побединский Виталий Владимирович, vitaly.pobedinsky@yandex.ru; Rogozin Никита Владимирович, niktrace@mail.ru; Меншикова Татьяна Геннадьевна, к.ф-м.н., menshikova.vrn@mail.ru; Бормонттов Евгений Николаевич, д.ф-м.н., me144@phys.vsu.ru

RESEARCH OF PLATINUM STUD-BUMP BONDS ON THIN-FILM METALLIZATION OF SILICON AND CERAMIC SUBSTRATES

V.V. Pobedinsky^{1,2}, N.V. Rogozin¹, T.G. Menshikova³, E.N. Bormontov²

¹"Scientific Research Institute of Electronics" ("NIET") JSC,
394033 Voronezh, Starykh Bol'shevikov st., 5

²Voronezh State University, 394018 Voronezh, Universitetskaya sq., 1

³Voronezh State Technical University, 394026 Voronezh, Moskovskiy av., 14

In this paper we present the research on platinum stud-bump bonds made within the modified thermosonic ball-wedge process on aluminum and platinum thin-film metallization of silicon and ceramic substrates. We show the experimental results of a stud-bump bond shear test, and give measured contact resistance values. In our research we performed the anneal test of platinum stud bump thermosonic bonds on platinum thin-film metallization with Ti sublayer on ceramic substrate (Al₂O₃) for 60 minutes at 900 °C in pure oxygen atmosphere.

Keywords: platinum, platinum thin-film metallization, thermosonic wirebonding, platinum anneal

Data on authors: Pobedinsky Vitaly Vladimirovich, vitaly.pobedinsky@yandex.ru; Rogozin Nikita Vladimirovich, niktrace@mail.ru; Menshikova Tatiana Gennadyevna, Ph.D., menshikova.vrn@mail.ru; Bormontov Evgeny Nikolaevich Sc.D., me144@phys.vsu.ru

Введение

Ультразвуковая микросварка (УЗС) алюминиевой (Al) проволокой методом клин-клин и термозвуковая микросварка (ТЗС) золотой (Au) проволокой методом шарик-клин – традиционные способы формирования электрических соединений между полупроводниковым кристаллом и корпусом большинства интегральных микросхем (ИМС) и полупроводниковых приборов (ПП). Однако электрические соединения широко используемых материалов, таких как Al и Au, могут не подходить для применения в определённых изделиях и решения конкретных задач. Ограничения по производительности и области применения ИМС и ПП могут приводить к существенным проблемам и задержкам при сборке, однако рассмотрение таких проблем на начальных стадиях проектирования изделия часто игнорируется [1]. Несмотря на то, что сборочные операции ИМС и ПП имеют большое значение, такого рода ограничения необходимо решать задолго до разработки фотошаблонов кристалла, особенно если изделие будет эксплуатироваться при высоких температурах и/или в химически агрессивных средах.

В отличие от УЗС Al проволоки, выполняемой при комнатной температуре, для ТЗС Au проволоки необходим нагрев рабочего стола до температуры ~ 150 °С. Несмотря на то, что и Al, и Au как материалы применяются для создания надёжных проволочных соединений при сборке ИМС и ПП [2], свойства этих материалов препятствуют их универсальному использованию для сборки всех изделий электронной техники. Низкая температура плавления Al 660 °С и соответственно низкая температура отжига 440 °С [3] ограничивают тем-

пературный диапазон, в котором он может применяться как материал для создания проволочных соединений. В дополнение к этому при увеличении температуры Al сварных соединений происходит их ускоренное окисление и деградация контакта. Золото не подвержено окислению и имеет более высокую температуру плавления 1064 °С, чем Al, однако температура отжига 710 °С ограничивает использование Au в устройствах с высокими требованиями по температурному диапазону [4]. Применение новых материалов актуально для корпусирования изделий, например, автомобильной электроники, а именно в выхлопных системах автомобильного двигателя, где температура может превышать 900 °С, а химическая среда изменяется с окислительной на восстановительную и обратно. В таких условиях требуется материал, не подвергающийся окислению, с высокой температурой плавления и обладающий способностью к микросварке к контактными площадкам стандартными методами микросварки шарик-клин или клин-клин.

Платина является оптимальным материалом для создания электрических соединений в ИМС и ПП ответственного применения. Она не окисляется, её температура плавления составляет 1872 °С, а отжиг происходит при температуре 1250 °С [5], что значительно превосходит свойства Au и Al. Предел текучести платины (Pt) составляет всего 10 МПа [5], меньше чем у Au 200 МПа [4] и Al 100 МПа [3], таким образом, предел пластичности Pt легко позволяет использовать её для микросварки методом шарик-клин или клин-клин.

В данной работе рассмотрена возможность применения тонкой Pt проволоки диаметром 25 мкм для ТЗС методом ша-

рик-клин различных подложек с контактными площадками из Pt и Al с толщиной покрытия 250 нм. Дана оценка качества сварного соединения на воздействие сдвигающей силы, проведено измерение контактных сопротивлений. Произведён отжиг сварных соединений Pt металлизации с адгезионным титановым (Ti) подслоем на керамической подложке (Al_2O_3) при температуре 900 °С в течение 60 минут в среде чистого кислорода.

Методика эксперимента

В работе использовались алюмооксидные подложки из высокотемпературной керамики Al_2O_3 размером $60 \times 60 \times 0,15$ мм и пластины монокристаллического кремния (Si) диаметром 100 мм с ориентацией $\langle 100 \rangle$.

Керамические подложки отмывались и обезжиривались в кипящем растворе трихлорэтилена (C_2HCl_3), ацетона (C_3H_6O) и изопропилового спирта ($CH_3CH(OH)CH_3$) в соотношении 1:1:1. Кремниевые пластины сначала отмывались в растворе пероксида водорода (H_2O_2) и гидроксида аммония (NH_4OH), затем в растворе H_2O_2 с соляной кислотой (HCl).

После отмывки и обезжиривания Si пластины подвергались окислению при температуре 1000 °С в среде осушенного

кислорода. Толщина полученного оксида кремния (SiO_2) составляла 200 нм.

Затем на оба типа подложек наносилась тонкоплёночная Pt металлизация с адгезионным подслоем Ti методом магнетронного напыления. Алюминиевая металлизация наносилась на подложку методом осаждения из паровой среды. Отжиг образцов производился при температуре 900 °С в течение 60 минут в атмосфере чистого кислорода. Сварные соединения формировались на серийной установке ультразвуковой (термозвуковой) микросварки тонкой проволокой Delvotec 64000 G5 с рабочим керамическим капилляром SPT UTE-38IG-C на технологических режимах, приведенных в табл. 1.

В работе использовалась платиновая проволока фирмы Heraeus со следующими характеристиками: химический состав материала проволоки – Pt 99,99%, диаметр проволоки – 25 мкм, относительное удлинение $> 0,1\%$, разрывные усилия – 10-20 сН.

Данные технологические режимы, формирования проволочных соединений и характеристики проволоки позволили создать сварные соединения, которые были исследованы с помощью растрового электронного микроскопа Jeol JSM-6380LV. Размер сварных соединений составил ~ 3 диаметра проволоки (рис. 1).

Таблица 1

Технологические режимы формирования Pt проволочных соединений на Pt и Al тонкоплёночной металлизации, нанесённые на Si и Al_2O_3 подложки

Параметр	Значение параметра
Отклонение по времени микросварки	Контролируется автоматически в диапазоне 16-24 мс
Усилие сварки	30-35 г
Параметры электрического разряда, образующего шарик	
ток	34 кА
напряжение	2,2 кВ
длительность	2,4 мс

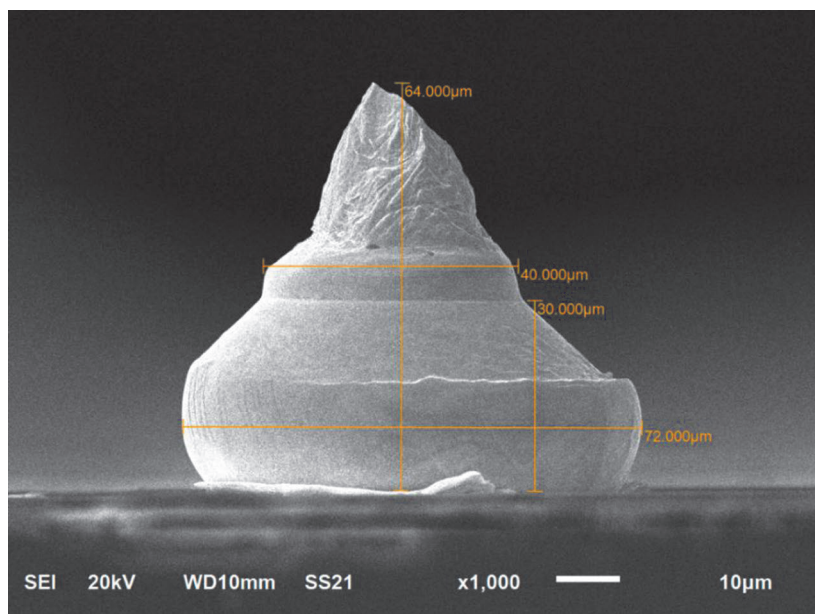


Рис. 1

Сварное соединение Pt проволоки, сформированное методом шарик-клин, на тонкоплёночной Pt металлизации толщиной 250 нм, напылённой на поверхность монокристаллического Si с ориентацией <100>

Формирование сварных соединений было реализовано с помощью модификации стандартного процесса проволоочной разварки, а именно с помощью программного обеспечения было убрано «лишнее» движение сварочной головки, связанное с формированием траектории петли проволоочных выводов и формированием второй точки сварки [6].

На сформированных Pt сварных соединениях с помощью тестера сварных соединений Dage 4000 и картриджа BS250R проведены измерения усилия на сдвиг всех соединений каждого образца.

С целью контроля качества сформированных сварных соединений шариков из Pt проволоки и поверхности металлизации подложек, настройки оборудования термовзвучковой микросварки использовались передовые мировые стандарты [7-9], согласно которым минимальное усилие на сдвиг сварного соединения диаметром 80

мкм составляет 25,1 гс (грамм-сила), при этом среднее значение по результатам испытания образца должно быть не менее 35,6 гс.

Для измерения контактного сопротивления проволоочного сварного соединения с тонкоплёночной платиновой контактной площадкой использовался четырёхзондовый метод на установке ИУС-3 при токе 10 мА.

Результаты и обсуждение **Тонкоплёночная металлизация на кремниевой подложке**

В ходе исследования прочностных характеристик сварных Pt соединений и контактного сопротивления Pt проволоки к Pt тонкоплёночной металлизации на подложке из чистого Si установлено, что Pt имеет высокую адгезию к чистому Si, особенно если Pt напылять на поверхность кремниевой пластины непосредственно

сразу после удаления естественного SiO₂ (образец № 1). Сварные соединения Pt проволоки к тонкоплёночной Pt металлизации толщиной 250 нм, сформированные методом шарик-клин на Si подложке, имеют значение усилия на отрыв 41,78 гс, контактное сопротивление Pt проволоки к Pt тонкоплёночной металлизации составляет $\leq 0,05$ Ом. Высокотемпературный отжиг образцов Si подложек с тонкоплёночной Pt металлизацией и сварными Pt проволочными соединениями не проводился, так как из [10,11] известно, что при температуре 200 °C Pt вступает в реакцию с Si с образованием силицидов Si.

Для увеличения адгезии Pt к SiO₂ поверхность выращенного на Si слоя SiO₂ толщиной 160 нм напылялся адгезионный подслоем титана (Ti) толщиной 200 нм (образцы № 2, 3). Сразу после нанесения Ti без нарушения вакуума на подложку напыляется слой Pt толщиной 250 нм. Среднее значение усилия на сдвиг проволочных соединений на образце № 2 составляет 40,98 гс, результаты измерений контактного сопротивления сварных соединений оказались сходными с предыдущим экспериментом. Проводился высокотемпературный отжиг при температуре 900 °C в течение 60 минут на образце № 3 в среде чистого кислорода. Известно, что взаимодействие Ti и SiO₂ происходит уже при 800 °C и приводит к образованию силицидов титана [12]. В нашем эксперименте, Ti подслоем провзаимодействовал с SiO₂, что привело к полному разрушению контактов.

Алюминий чаще всего применяется как материал для создания многослойной металлизации в интегральных микросхемах. Этот материал плавится при температуре 660 °C и легко окисляется. При повышении

температуры происходит ускоренное окисление Al сварных соединений, что приводит к деградации контакта. Этот фактор делает Al как материал контактных площадок непригодным для применения в приборах с высоким температурным диапазоном. Поэтому в данной работе не проводилось каких-либо исследований по высокотемпературному отжигу сварных соединений тонкой Pt проволоки с тонкоплёночной Al металлизацией. Сварные соединения Pt проволоки с Al контактными площадками на Si подложке с SiO₂ пассивацией (образец № 4) имеют усилия на сдвиг 40,95 гс и их контактное сопротивление $\leq 0,05$ Ом, что аналогично результатам, полученным с тонкоплёночной Pt металлизацией на подложке из чистого Si.

Тонкоплёночная платиновая металлизация на керамической подложке

Исследования прочностных характеристик сварных Pt соединений и контактного сопротивления Pt проволоки к Pt тонкоплёночной металлизации на подложке Al₂O₃ размером 80×80×0,15 мм (образец № 5) с адгезионным подслоем Ti толщиной 200 нм, который наносился методом магнетронного напыления, после чего без нарушения вакуума напылялась Pt металлизация толщиной 250 нм, показали, что усилия на сдвиг проволочных Pt сварных соединений к полученной таким способом металлизации имеют значения 42,34 гс, а контактное сопротивление таких соединений составляет $\leq 0,05$ Ом.

Образец № 6, аналогичный образцу № 5, с Pt металлизацией на тонкоплёночном адгезионном Ti подслое на Al₂O₃ подложке с Pt проволочными сварными соединениями подвергся высокотемпе-

ратурному отжигу при 900 °С в течение 60 минут в среде чистого кислорода. Контактное сопротивление сварных соединений тонкой Pt проволоки диаметром 25 мкм к тонкоплёночной Pt металлизации толщиной 250 нм с Ti подслоем толщиной 200 нм после испытания осталось неизменным и составило $\leq 0,05$ Ом. Усилие на сдвиг проволочных соединений уменьшилось, однако осталось достаточно высоким и составило 37,5 гс. Стоит отметить, что в процессе проведения испытаний на сдвиг сварных проволочных соединений большинство проволочных соединений разрушилось без нарушения Pt металлизации (рис. 2).

Известно, Ti взаимодействует с Al_2O_3 подложкой [13], но скорость этого процесса такова, что контакт Pt проволоки с тонкоплёночной Pt металлизацией за время

отжига при 900 °С в течение 60 минут в среде чистого кислорода не деградировал. Однако наблюдалось некоторое взаимодействие между Pt и Ti плёнками, что подтверждает бинарная фазовая диаграмма Pt/Ti, которая предполагает формирование сплавов Pt-Ti при температурах близких к 600 °С [14]. Тем не менее процесс легирования не ухудшает качество сварных соединений.

На рис. 3 представлены результаты измерений усилий на сдвиг Pt проволочных соединений шести образцов.

Обобщённые результаты измерения усилий сдвига и измерений контактного сопротивления сварных соединений методом шарик-клин платиновой проволоки к Pt и Al тонкоплёночной металлизации на керамические и кремниевые подложки приведены в табл. 2.

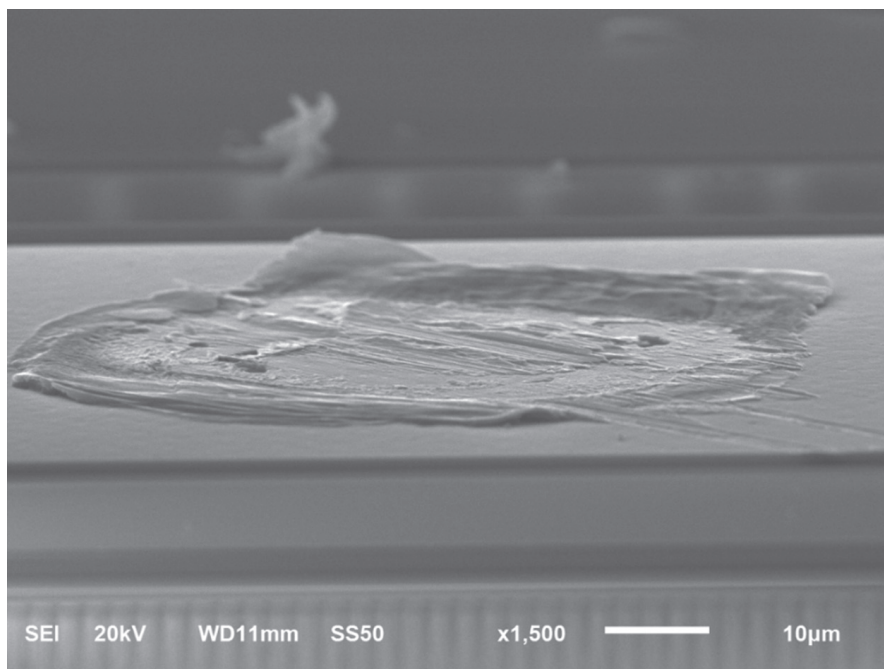


Рис. 2

SEM-фотография Pt металлизации с адгезионным Ti подслоем на Al_2O_3 подложке после высокотемпературного отжига при 900 °С в течение 60 минут и испытания проволочного соединения на сдвиг

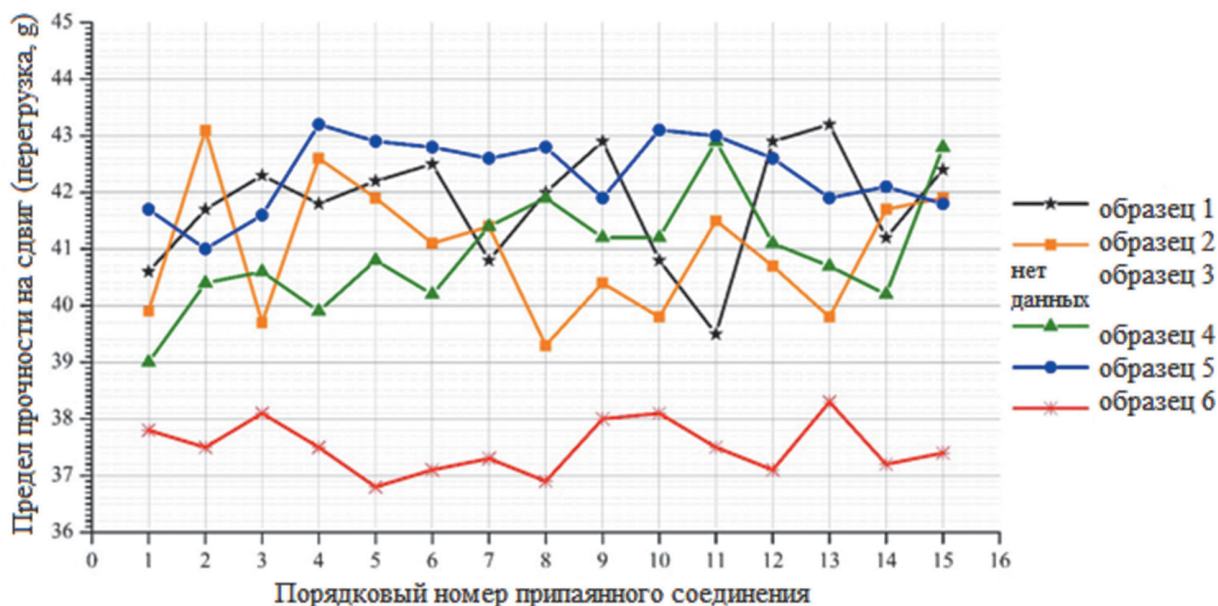


Рис. 3

Результаты измерений усилий на сдвиг Pt проволочных соединений: образец № 1 – тонкоплёночная Pt металлизация на подложке из чистого Si; образцы № 2, 3 – тонкоплёночная Pt металлизация с подслоем Ti на кремниевой подложке с SiO₂ пассивацией; образец № 4 – тонкоплёночная Al металлизация на кремниевой подложке с SiO₂ пассивацией; образец № 5 – тонкоплёночная Pt металлизация с подслоем Ti на кремниевой подложке; образец № 6 – тонкоплёночная Pt металлизация с подслоем Ti на керамической подложке после отжига

Таблица 2

Результаты измерений усилий сдвига Pt проволочных соединений и измерений контактного сопротивления сварных соединений, сформированных методом шарик-клин, Pt проволоки к Pt и Al тонкоплёночной металлизации на Si и Al₂O₃ подложках

№ образца	1	2	3	4	5	6
Материал подложки	Si	Si	Si	Si	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
Толщина SiO ₂ , нм	–	200	200	200	–	–
Толщина плёнки Ti, нм	–	200	200	–	200	200
Толщина плёнки Pt, нм	250	250	250	–	250	250
Толщина плёнки Al, нм	–	–	–	250	–	–
Испытание на высоко-температурный отжиг	–	–	+	–	–	+
Усилие на сдвиг проволочных соединений, гс	41,78	40,98	0	40,95	42,34	37,5
Контактное сопротивление, Ом	≤ 0,05	≤ 0,05	∞	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05

Заключение

Показано, что качественная микро-сварка тонкой Pt проволокой модифицированным методом шарик-клин в решающей степени зависит от адгезии тонкоплёночной металлизации контактных площадок к материалу подложки. Отмечается, что отслоение сварного соединения во время процесса микросварки или отшелушивание самих контактных площадок зависит от адгезии Pt или Al металлизации к Si или Al₂O₃ подложке. Экспериментально установлено, что в случае, когда тонкоплёночная металлизация имеет высокую адгезию к подложке, как в экспериментах с тонкоплёночной Pt металлизацией на подложке из чистого Si или на Al₂O₃ подложке с адгезионным подслоем Ti, такие сварные соединения

тонкой Pt проволокой имеют низкое контактное сопротивление и высокие усилия на сдвиг. Установлено, что высокотемпературный отжиг при 900 °С в течение 60 минут в среде чистого кислорода сварных соединений Pt проволоки на Al₂O₃ подложке не привёл к деградации контакта, а лишь незначительно уменьшил средние значения усилий на сдвиг 42,34 гс до отжига и 37,5 гс после отжига, тем не менее даже уменьшенные средние значения усилия на сдвиг сварных соединений на 5,34 % превышают рекомендуемые стандартами значения.

Конфликт интересов

Авторы подтверждают, что предоставленные данные не содержат конфликта интересов.

Литература

1. Побединский, В.В. Применение платиновой металлизации в системе перераспределения контактных площадок кристаллов полупроводниковых изделий для сборки по технологии «flip-chip» / В.В. Побединский, Н.В. Рогозин, Е.Н. Бормонтов // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2019. – №4 (255.) – С. 27-34.
2. 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. – ISBN 978-985-6845-51-5.
3. Аллюминий: свойства и физическое металловедение: Справ. // Под ред. Дж. Хэтча. – М.: Металлургия, 1989. – 424 с.
4. Цветные металлы и сплавы: учебное пособие / Т. В. Мальцева, Н. Н. Озерец, А. В. Левина, Е. А. Ишина. – Екатеринбург: Изд-во Урал. унта, 2019. – 176 с.
5. Платина, её сплавы и композитные материалы. / Е.В. Васильева, Р.М. Волкова, М.И. Захарова, М.П. Матвеева, Г.Д. Шнырев., – М.: Металлургия, 1980.– 296 с.
6. Побединский, В.В. Платиновые стад-бампы с припойными шариками на алюминиевой металлизации кремниевых кристаллов в технологии flip-chip / В.В. Побединский, Н.В. Рогозин, Е.В. Лаврентьев, А.В. Рябов, В.В. Зенин, Е.Н. Бормонтов // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. – 2018. – Выпуск 2 (170). – С. 27-31.
7. MIL-STD-883J (Methods 1000-1034). Department of defense test method standard - MICROCIRCUITS: 1000 TO 1034.1, Series test methods (07-Jun-2013), 196 p.
8. JEDEC standard. JESD22-B116A. Wire Bond Shear Test Method standard by JEDEC Solid State Technology Association, 08.01.2009, 17 p.
9. AEC - Q100-011 REV-C. Automotive Electronics Council, Charged device model (CDM), Electrostatic discharge test, 2012, 19 p.

10. Electrochemically Engineered Nanoporous Materials. Springer Series in Materials Science, vol.220, 2015, pp 219-288.
11. Zollner S., Grudowski P., Thean A., et al. Dual silicide SOI CMOS integration with low-resistance PtSi PMOS contacts. IEEE International SOI Conference 1-4 Oct. 2007, pp 75-76.
12. Ming He, Toh-Ming Lu. Metal-dielectric interfaces in gigascale electronics. Springer - Verlag New York, 2012, vol.157, pp 75-89.
13. Сыпченко, В.С. Взаимодействие водорода с тонкой плёнкой Al_2O_3 на нанокристаллическом титане: автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. – Томск, 2016. – 23 с.
14. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник в 3-х томах / Под ред. Н.П. Лякишева. – Москва, Машиностроение, 2001. – 377 с.
1. Pobedinsky V.V., Rogozin N.V., Bormontov E.N. Primeneniye platinovoy metallizatsii v sisteme pereraspredeleniya kontaktnykh ploshchadok kristallov poluprovodnikovyykh izdeliy dlya sborki po tekhnologii «flip-chip» [Platinum metallization in semiconductor dies contact pads redistribution system for the “flip-chip” die packaging technology]. Electronic engineering. Series 2. Semiconductor devices. 2019, iss. 4 (255), pp. 27-34.
2. Zenin, V.V., Emelyanov V.A., Lanin V.L. Montazh kristallov i vnutrennikh vyvodov v proizvodstve poluprovodnikovyykh izdeliy [The process of installation of crystals and internal leads in the production of semiconductor devices]. Minsk, Integral-part, 2015, 380 p. ISBN 978-985-6845-51-5.
3. Alyuminiy: svoystva i fizicheskoye metallovedeniye [Aluminum properties and physical metallurgy]. Ed. John E. Hatch. Moscow, Metallurgiya, 1984. 424 p.
4. Maltseva T.V., Ozeretz N.N., Levina A.V., Ishina E.A. Tsvetnyye metally i splavy: uchebnoye posobiye [Nonferrous Metals and Alloys: manual]. Yekaterinburg, Ural University publ., 2019. 176 p.
5. Vasilyeva E.V., Volkova R.M., Zakharova M.I., Matveeva M.P., Shnyrev G.D. Platina, yeye splavy i kompozitnyye materialy [Platinum, its alloys and composites]. Moscow, Metallurgiya, 1980, 296 p.
6. Pobedinsky V.V., Rogozin N.V., Lavrentiev E.V., Ryabov A.V., Zenin V.V., Bormontov E.N. Platinovyye stad-bampy s pripoynymi sharikami na alyuminiyevoy metallizatsii kremniyevykh kristallov v tekhnologii flip-chip [Platinum stud-bumps with solder balls on aluminum metallization of silicon dies in flip-chip technology]. Electronic engineering. Series 3. Microelectronics, 2018, iss. 2 (170), pp. 27-31.
7. MIL STD 883J (Methods 1000-1034). Test method standard - microcircuits, USA Department of defense, 2013, Series test methods, 196 p.
8. JEDEC standard. JESD22-B116A. Wire Bond Shear Test Method standard by JEDEC Solid State Technology Association, 2009, 17 p.
9. AEC - Q100-011 REV-C. WIRE BOND SHEAR TEST (Automotive Electronics Council, 2014) p.14.
10. Kim Y.H., Kim T.H., Electrochemically Engineered Nanoporous Materials. Springer Series in Materials Science, vol. 220, 2015, pp. 219-288.
11. Zollner, S. Dual Silicide SOI CMOS Integration with Low-Resistance PtSi PMOS Contacts. IEEE International SOI Conference, 2007, pp. 75-76.
12. He Ming, Lu Toh-Ming. Metal-Dielectric Interfaces in Gigascale Electronics. New York, Springer, 2012. pp. 75-89. ISBN 978-1-4614-1811-5.
13. Sytchenko, V.S. Vzaimodeystviye vodoroda s tonkoy plonkoy Al_2O_3 na nanokristallicheskom titane [Hydrogen interaction with thin Al_2O_3 film on nanocrystalline titanium] Abstract of Ph. D. thesis. Tomsk, 2016, 59 p.
14. Diagrammy sostoyaniya dvoynnykh metallicheskikh sistem [Equilibrium diagrams of dual metal systems]. Ed. N.P. Lyakishev. Moscow, Mashinostroyeniye, 2001, 377 p.

References