

МЕТОДЫ МОНТАЖА КРИСТАЛЛОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КРЕМНИЕВЫХ ТРАНЗИСТОРНЫХ СТРУКТУР

Т. А. ИСМАИЛОВ, А. Р. ШАХМАЕВА, Б. А. ШАНГЕРЕЕВА, Т. Э. САРКАРОВ

*Дагестанский государственный технический университет, 367015, Махачкала, Россия
E-mail: bijke@mail.ru*

Представлены различные методы присоединения кристаллов к корпусам полупроводниковых приборов. Качество паяных контактов в существенной степени зависит от образования соединений между компонентами припоя и металлическим покрытием. Для пайки кремниевых кристаллов предложен припой ПОС-5, соответствующий температуре плавления и узкому температурному интервалу затвердевания, что обеспечивает отсутствие усадочной пористости в паяном шве. Приведены результаты испытаний проволоки из сплава ПОС-5 на паяемость кристаллов транзисторных структур.

Ключевые слова: кристалл, дефект, рамка, припой, сплав, пайка, прибор, капля, подложка

Введение. Эксплуатационная надежность полупроводниковых приборов определяется в основном теплоэлектрическим состоянием, которое формируется на стадии присоединения кристалла к корпусу. При посадке кристалла на основание корпуса прибора иногда могут образовываться скрытые дефекты (сколы, пустоты, микротрещины), которые приводят к появлению участков с аномально высоким тепловым сопротивлением и к последующему выходу прибора из строя. Если площадь дефектов мала относительно площади кристалла и не оказывает влияния на активную структуру транзистора, то основная часть изделия характеризуется низким уровнем теплового сопротивления. Однако при длительной эксплуатации в экстремальных или неблагоприятных условиях надежность таких изделий существенно снижается вследствие того, что рост дефектов может привести к отказам элементов микросхемы. Уровень остаточных термических напряжений зависит от качества присоединения кристаллов на припой.

Наличие в паяном шве пузырей воздуха и других газов приводит к локальному перегреву термически нагруженных компонентов модуля и выходу его из строя [1, 2].

Паяемость — это способность материала смачиваться расплавленным припоем и образовывать с ним качественное паяное соединение. Паяемость определяется физико-химической природой материалов и припоя, способом и режимами пайки, флюсующими средами, условиями подготовки паяемых поверхностей и т. д. Для образования паяного соединения необходимо и достаточно смачивания поверхности металла расплавом припоя, что определяет возможность дальнейшего образования между ними химических связей. Паяное соединение должно иметь низкое переходное электрическое сопротивление, герметичность и требуемую прочность при различных условиях работы [3].

В полупроводниковой технологии существуют различные способы монтажа кристаллов на подложку [4, 5]: пайка припоями, пайка эвтектическими сплавами, приклеивание

токопроводящими клеями на органической основе, присоединение с помощью легкоплавких или тугоплавких стекол. Каждый из способов должен обеспечивать максимальный отвод тепла, высокую механическую прочность соединения, малое сопротивление контакта.

Также известен способ посадки кремниевого кристалла на основание корпуса полупроводникового прибора, заключающийся в последовательном напылении на посадочную поверхность кристалла слоев металлов и пайке кристалла к основанию корпуса; процесс проводят в едином технологическом цикле, а пайку кристалла к основанию корпуса проводят при температуре 300—320 °С [6, 7].

Для способа посадки кристалла на эвтектические сплавы, помимо технологических трудностей, характерны высокая температура, значительные механические напряжения, что приводит к сколам кристаллов и снижению надежности приборов, отслаивание кристаллов из-за неполного образования эвтектики по всей площади, образование микротрещин и растрескивание кристаллов после пайки и термокомпрессионной разварки выводов.

Пайка считается единственным из всех перечисленных способом, обеспечивающим электрические и тепловые характеристики силовых полупроводниковых приборов, так как припой обладает лучшей теплопроводностью и электропроводностью, чем стекла и клеи. Если кристаллы приборов имеют значительную мощность рассеяния (более 0,5 Вт), то между подложкой кристалла и посадочной площадкой выводной рамки необходимо создать токопроводящий электрический контакт с незначительным электрическим и тепловым сопротивлением, что достигается использованием методов пайки. В приборах, мощность рассеяния кристалла в которых невелика, а электрическое сопротивление между подложкой кристалла и рамкой незначительно влияет на работу устройства, кристалл приклеивают на токопроводящую композицию.

Качество пайки кристалла во многом зависит от месторасположения припоя перед пайкой. При размещении прокладки припоя непосредственно под кристаллом существует вероятность, что в процессе пайки оксидные пленки и загрязнения на поверхности прокладки при расплавлении останутся в зоне шва, ухудшая смачиваемость припоем поверхности кристалла и приводя к образованию непропаев, что нарушает сплошность шва и ведет к ухудшению его теплопроводности и снижению надежности полупроводниковых изделий [2].

Пайка металлов и полупроводников сплавами на основе свинца. Для смачивания поверхности твердого металла жидким припоем необходимо их взаимодействие, что происходит при образовании химических соединений и твердых растворов [2]. Окисная пленка, практически всегда имеющаяся на поверхности паяемых металлов и припое, является диффузионным барьером для смачивания.

В практике безфлюсовой низкотемпературной пайки для активизации смачивания используется ряд специальных приемов:

- применение припоев с легирующими элементами, которые активно взаимодействуют с паяемыми металлами;
- создание на поверхности паяемого материала развитой системы капилляров и шероховатостей;
- создание на поверхности материала пористой губчатой структуры;
- введение в зазор губчатой прокладки;
- создание порошковых припоев, состоящих из смеси легкоплавких и более тугоплавких металлов и сплавов.

Также известны и тому подобные приемы.

Фактор растекания P , предложенный в работе [8], вычисляется как

$$P = 100 (D-H)/D,$$

где D — диаметр сферы, имеющей объем, эквивалентный объему используемого припоя; H — высота капли припоя.

Если отсутствует сила тяжести, то капля припоя будет иметь форму сферы, где $D \equiv H$ и $P=0$. Это свидетельствует об отсутствии паяемости [9]. Оценка паяемости покрытий приведена в табл. 1, здесь θ — угол смачивания поверхности припоем, вычисленный по площади растекания.

Таблица 1

Фактор растекания P	Паяемость	θ, \dots°
60	Очень плохая	50
60—70	Плохая	50—34
70—80	Удовлетворительная	34—12
80—90	Хорошая	12—3
90	Отличная	3

Учитывая, что в реальных условиях пайки высота „лежащей“ капли $H_{пр}$ расплавленного припоя всегда меньше диаметра D гипотетической сферы припоя, для расчета коэффициента растекания припоя K_p использовано выражение [9]

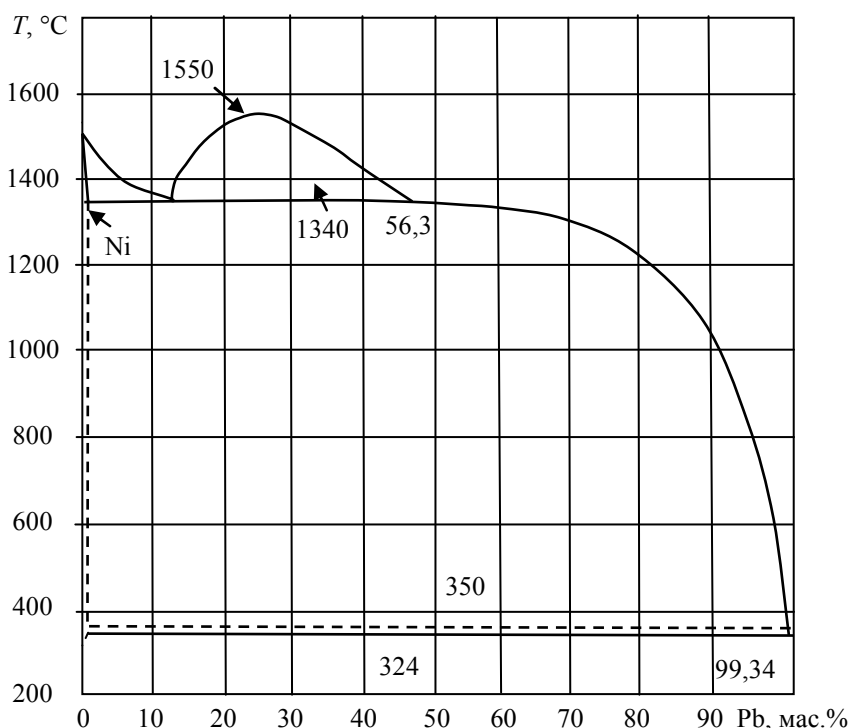
$$K_p = \frac{H_{пр} - H}{H_{пр}}, \quad H_{пр} = \frac{\sqrt{2\sigma(1 - \cos \theta)}}{\rho g},$$

где σ — поверхностное натяжение припоя, ρ — его плотность, g — ускорение свободного падения.

Испытания на растекание гальванических покрытий со значительными окисными пленками показали, что припой растекался под ними и это затрудняло контроль площади растекания. Отсюда следует, что испытания по анализу площади растекания не подходят для составленных покрытий большой толщины.

По известной технологии на подложку из медного сплава наносится никель гальваническим путем, никель напыляется и на обратную сторону кремниевого кристалла, что позволяет создать прочное соединение в паяных изделиях с использованием припоя ПОС-5. В этом случае смачиваемость поверхности контактной площадки и качество посадки удовлетворительные.

На рисунке представлена диаграмма состояния системы никель—свинец по данным работ [10, 11]. Как видно из диаграммы, система образует эвтектическую смесь свинец—никель при температуре $T=324^\circ\text{C}$ и содержит 0,11 мас.% никеля.



Растворимость свинца в никеле в твердом состоянии оценивается в 4 %; растворимость никеля в твердом свинце составляет 0,023 % и при температуре эвтектики — 0,1955 %.

Введение олова в свинец в количестве от 5 до 15 % снижает угол смачивания никеля до нуля при температуре 500 °С [12]. Так как добавка олова повышает поверхностное натяжение жидкого свинца, олово по отношению к свинцу не является поверхностно-активным элементом. В то же время олово является межфазно-активным на границе расплавов свинец—никель, что улучшает смачиваемость. С увеличением содержания олова до 30 % и более смачиваемость ухудшается, что можно объяснить, по-видимому, образованием и ростом прослойки интерметаллида на границе раздела расплавов. Значения угла смачивания никеля расплавом свинец—олово в среде водорода приведены в табл. 2 [10].

Таблица 2

Температура, °С	$\theta, \dots^\circ,$ при содержании олова в припое, %						
	0	5	15	30	40	61	100
330	52	32	23	16	15	18	61
500	52	0	0	8	9	13	26

Анализ таблицы показывает, что с увеличением температуры смачиваемость расплавом никеля увеличивается от 5 до 40 % олова. Наилучшее смачивание наблюдается при температуре 500 °С в интервале концентрации 5—15 %, а при более низкой температуре 330 °С — 30—40 %.

Однако увеличение содержания олова в припое приводит к росту температурного интервала затвердевания сплавов, что нежелательно при их использовании в качестве припоя, так как большой температурный интервал кристаллизации приводит к значительному увеличению времени затвердевания припоя и вызывает увеличение усадочной пористости в зоне пайки.

В табл. 3 приведены некоторые типичные припои на основе свинца, легированные оловом, здесь же дана область плавления сплавов.

Таблица 3

Содержание олова, %	Область плавления, °С	
	Солидус	Ликвидус
Свинец	327,4	327,4
2	316	322
5	305	313
10	310	330
20	183	277
25	183	268
30	183	255
35	183	247
40	183	234
50	183	212
60	183	188
70	183	193
90	183	210
Олово	231,9	231,9

Как видно из табл. 3, сплавы с содержанием олова до 10 % имеют область плавления выше 300 °С, остальные — существенно ниже.

Для оценки припоев на паяемость были предложены испытания на растекаемость, на смачиваемость и на высоту подъема расплава в капилляре. Подробный обзор методов определения паяльных качеств припоев приведен в работе [13]. Однако ни один из предложенных методов не может быть принят в качестве стандартного.

Наиболее высокая растекаемость наблюдается у сплавов с содержанием олова от 20 до 70 %, у чистых металлов — свинца и олова — растекаемость наиболее низкая и практически не зависит от материала подложки. Поэтому и применение припоя ПОС-5 для пайки кремниевых кристаллов соответствует требованиям по температуре плавления и узкому температурному интервалу затвердевания, что обеспечивает отсутствие усадочной пористости в паяном шве. Другое достоинство припоя ПОС-5 — практическая неизменность механических свойств по сравнению со сплавами эвтектического и близкого к ним состава. В этих случаях из-за старения сплава наблюдается некоторое снижение прочности паяных соединений при комнатной и особенно при повышенной температуре (100—140 °С) [12].

Так как никель обладает наименьшей, среди перечисленных металлов, скоростью растворения и склонностью к образованию интерметаллидов со сплавами свинец—олово, подложка, на которую припаивается кристалл, покрывается слоем никеля в 1—4 мкм, наносимого гальваническим путем, на обратную сторону кристалла никель наносится термическим напылением. Технологичность нанесения никелевого покрытия состоит еще и в том, что на контактные площадки приборов, покрытых никелем, легко происходит сварка микропроводов из алюминия или золота, являющихся токопроводящими компонентами полупроводниковых приборов.

Покрытия корпусов полупроводниковых изделий никелем и его сплавами широко используются в электронной промышленности [14]. Основным недостатком никелевых покрытий является низкая теплостойкость, потому они применимы только при низкотемпературном монтаже элементов и при пайке в защитной среде.

Механическая прочность паяных соединений существенно снижается при повышении температуры и очень резко при увеличении толщины покрытия [15].

Свойства покрытий существенным образом зависят от подготовки медных корпусов к никелированию. Были исследованы покрытия, которые наносились на медные основания корпусов без полирования и с предварительным электрохимическим полированием поверхности [16]. Анализ микроструктуры никелевых покрытий медных корпусов показал, что на полированной медной основе структура покрытий более мелкозернистая, чем на неполированной [14].

Для повышения блеска никелевых покрытий, снижения внутренних напряжений и интенсификации процесса никелирования используют специальный электролит [17]. В состав электролита входят серноокислый никель (150—250 г/л), серноокислый магний (20—60 г/л), серноокислый натрий (5—15 г/л), борная кислота (25—35 г/л), бензолсульфамид (0,1—0,8 г/л), 2,2'-дипиридил (0,005—0,01 г/л), триэтил- α -метилнафтиламмонит хлорид (0,002—0,02 г/л). Электроосаждение ведется при 40—55 °С, плотности тока 1—20 А/дм² и рН=4,0...5,5.

Вводимый в состав электролита бензолсульфамид способствует, по утверждению авторов [17], снижению внутренних напряжений, переводя их из напряжений растяжения в напряжения сжатия, более того, повышается рассеивающая способность электролита. Также эта процедура положительно сказывается на качестве и свойствах покрытий, которые становятся более плотными, блестящими и не отслаиваются от подложки при деформации. Повышение содержания бензолсульфамида более чем на 0,8 г/л приводит к росту внутренних напряжений сжатия, а его снижение до 0,1 г/л вызывает хрупкость покрытий.

Прочность оловянно-свинцовых припоев имеет максимум при эвтектическом составе (см. рисунок), а прочность чистого олова или свинца намного ниже прочности припоев.

Механические характеристики припоев приведены в табл. 4 [18], где σ_b — временное сопротивление при растяжении, $\tau_{ср}$ — предел прочности на срез, δ — зазор, E — модуль упругости, G — модуль сдвига.

Таблица 4

Припой	T , °C	σ_b , МПа	τ_{cp} , МПа	δ , %	E , ГПа	G , ГПа
ПОиНКС1	105	23	—	32	3	1,2
ПОиНКС2	105	6	—	150	3	1,2
ПОСК 50—18	145	39,3	—	40	—	—
ПОС-611	190	47	34	46	12	4,6
ПОС-40	238	37,2	38	52	—	—
ПОССу	216	37,2	—	62	—	—
Олово	232	25,5	20	52	46	18
Свинец	327	13	13	35	—	—
ПСр45	725	370	—	10	—	—
ПСр70	755	310	—	30,5	—	—
ПСр25	775	365	—	8	16	8
Серебро	960,5	392	—	2	83	—
Медь	1083	176	—	20	82	—
ПОиНКС3	105	28	—	28	11,6	30
ПОС-613	190	50	—	32	39,7	31

Экспериментальные исследования. Установка для испытания проволоки из сплава ПОС-5 на паяемость кристаллов транзисторных структур представляет собой автомат для пайки кристаллов на нагретые рамки, подаваемые в зону посадки. Автомат имеет горизонтальную нагревательную печь, закрытую в кожух из нержавеющей стали. Длина печи около 600 мм. В выходном конце печи в кожухе имеется отверстие, через которое подается припойный сплав на поверхность сдвигаемой периодически рамки. Затем кристалл захватывается присоской и переносится на поверхность площадки рамки, находящейся на ней с капелькой припоя, и притирается к поверхности. Амплитуда и частота колебаний кристалла и нагрузка на него регулируются в широких пределах и могут быть заданы как в процессе работы, так и при наладке установки.

Рамки изготавливаются из медных сплавов в виде лент толщиной 2 мм. С помощью фрезерования лента обрабатывается на глубину 1,5 мм и на 20 мм по ширине. Затем из нее методом штамповки вырубается рамки на 16 корпусов приборов. Рамки покрыты гальваническим никелем толщиной несколько микрон. Пайка кристалла производится на покрытую никелевую площадку при помощи припоя свинец—олово. Рамки приборов набираются в контейнер, который устанавливается на стеллажах установки.

Затем рамки одна за другой автоматически подаются в печь и после припайки кристаллов снова загружаются в контейнер. По мере опустошения контейнера на входе и заполнения контейнера на выходе устанавливаются другие контейнеры. Все остальные операции автоматизированы, задаются и контролируются с помощью ЭВМ. Контроль операции пайки осуществляется с помощью двух телевизионных камер с выводом изображения на экран телевизора. С их помощью можно наблюдать увеличенное изображение позиции нанесения припоя на площадку рамки и пайку кристалла, наличие галтели припоя на торце кристалла. В случае нарушения заданных режимов работы установка автоматически отключается. Для исключения окисления поверхности рамки при ее нахождении в печи под кожух подается инертный или восстановительный газ через систему вентиля, автоматически регулирующих расход и смешивание газов.

В качестве подложки, на которую припаяется кристалл, использованы импортная и отечественная рамки. Температурные режимы пайки менялись от 360 до 400 °C. Одновременно с изготовленной припойной проволокой ПОС-5 использован для сравнения импортный припой. Качество посадки определялось по механическому отрыву кристалла и наличию галтели припоя на его торцах.

Заключение. Согласно испытаниям смачиваемость поверхности контактной площадки рамки припоем ПОС-5 хорошая, качество посадки удовлетворительное и сопоставимо с каче-

ством посадки импортным припоем. Внешний вид проволоки соответствует техническим требованиям: отсутствуют трещины, шелушение и расслаивание, четко выдерживается диаметр. При проведении испытаний механизм подачи проволоки автомата работал устойчиво, проволока не загрязняет деталей механизма подачи, налипания проволоки не наблюдается.

В статье не ставилась задача изменения свойств припоя ПОС-5, так как предполагалось лишь воспроизводство импортной проволоки применительно к оборудованию и технологии, закупленным за рубежом. Но свойства припойного сплава могут быть легко улучшены за счет легирования. К таким свойствам относятся механическая прочность, улучшение растекаемости по никелю или другим покрытиям, снижение температуры и т.д. Во многих случаях припой может заменить золото при пайке кремниевых кристаллов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колтаков А. Новые технологии силовой электроники//Компоненты и технологии. 2007. № 5.
2. Колтаков А. Новые технологии расширяют горизонты силовой электроники//Компоненты и технологии. 2007. № 4.
3. Ланин В. Паяемость выводов электронных компонентов//Технологии в электронной промышленности. 2010. № 4.
4. Алиев Ш. Д., Шахмаева А. Р., Шангереева Б. А. Современные технологические методы контроля пайки // Сб. тезисов докл. XXIV итоговой науч.-техн. конф. преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ДГТУ, 21—24 апр., 2003. Махачкала: ДГТУ, 2003. С. 87.
5. Исмаилов Т. А., Алиев Ш. Д., Шахмаева А. Р., Шангереева Б. А. Контроль качества посадки кристалла на основание корпуса // Измерение, контроль, информатизация: Сб. тр. Междунар. НТК. Барнаул: АГТУ, 2004. С. 55—56.
6. Пат. 2005141101/28 РФ, МПК H01L 21/58. Способ посадки кремниевого кристалла на основание корпуса / Т. А. Исмаилов, А. Р. Шахмаева, Б. А. Шангереева. Оpubл.10.12.09. Бюл. № 34.
7. Исмаилов Т. А., Шахмаева А. Р. Транзисторные структуры силовой электроники. СПб: Политехника, 2011. 125 с.
8. Harding W. B. Solderability testing // Plating. 1965. N 5.
9. Ланин В. Л., Хмыль А. А. Контроль паяемости выводов элементов радиоэлектронной аппаратуры // Неразрушающий контроль и системы управления качеством сварных и паяных соединений: Материалы семинара. М.: ЦРДЗ, 1992.
10. Хансен М., Андерко К. Структуры двойных сплавов. М.: Металлургиздат, 1962. Т. 2. 608 с.
11. Эллиот Р. П. Структуры двойных сплавов. М.: Металлургия, 1970. Т. 2. С. 456.
12. Яковлев Г. А. Пайка материалов припоями на основе свинца. М.: ЦНИИ „Электроника“, 1978.
13. Лашко С. В., Лашко Н. Ф. Пайка металлов. М.: Машиностроение, 1988. 376 с.
14. Зенин В. В., Рягузов А., Бойко В., Гальцев В., Фоменко Ю. Припой и покрытия для безсвинцовой пайки изделий микроэлектроники // Технология в электронной промышленности. 2005. № 2005. С. 46—51.
15. Груев И. Д., Матвеев Н. И., Сергеева Н. Г. Электрохимические покрытия изделий электронной аппаратуры: Справочник. М.: Радио и связь, 1988. 304 с.
16. Зенин В. В., Бокарев Д. И., Сегал Ю. Е., Фоменко Ю. Л. Свойства покрытий траверс корпусов силовых полупроводниковых приборов // Петербургский журнал электроники. 2002. № 4.
17. А.с. 1640210 СССР, А1 С25 D 3/12. Электролит никелирования / Д. К. Кушнер, А. П. Достанко, А. А. Хмыль, С. И. Козинцев, Ф. Б. Качеровская. Оpubл.07.04.91. Бюл. № 13.
18. Парфенов А. Введение в теорию прочности паяных соединений // Технологии в электронной промышленности. 2008. № 2.

Сведения об авторах

- Тагир Абдурашидович Исмаилов** — д-р техн. наук, профессор; Дагестанский государственный технический университет, кафедра теоретической и общей электротехники
- Айшат Расуловна Шахмаева** — канд. техн. наук, доцент; Дагестанский государственный технический университет, кафедра вычислительной техники
- Бийке Алиевна Шангереева** — канд. техн. наук, доцент; Дагестанский государственный технический университет, кафедра теоретической и общей электротехники; E-mail: bijke@mail.ru
- Тажутдин Экберович Саркаров** — д-р техн. наук, профессор; Дагестанский государственный технический университет, кафедра теоретической и общей электротехники

Поступила в редакцию
25.11.19 г.

Ссылка для цитирования: Исмаилов Т. А., Шахмаева А. Р., Шангереева Б. А., Саркаров Т. Э. Методы монтажа кристаллов при производстве кремниевых транзисторных структур // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 1. С. 61—69.

**METHODS FOR MOUNTING CRYSTALS
IN THE SILICON TRANSISTOR STRUCTURES PRODUCTION**

T. A. Ismailov, A. R. Shakhmayeva, B. A. Shangereeva, T. E. Sarkarov

*Dagestan State Technical University, 367015, Makhachkala, Russia
E-mail: bijke@mail.ru*

Various methods of attaching crystals to semiconductor device housings are presented. The quality of solder contacts depends significantly on the formation of connections between the solder components and the metal coating. For soldering silicon crystals, POS-5 solder is used, which corresponds to the melting temperature and a narrow temperature range of solidification, which ensures that there is no shrinkage porosity in the solder joint. Results of tests of POS-5 alloy wire on solderability of transistor structure crystals are presented.

Keywords: crystal, defect, frame, solder, alloy, soldering, device, drop, substrate

REFERENCES

1. Kolpakov A. *Components & Technologies*, 2007, no. 5, pp. 97–102. (in Russ.)
2. Kolpakov A. *Components & Technologies*, 2007, no. 4, pp. 116–119. (in Russ.)
3. Lanin V. *Technologies in Electronic Industry*, 2010, no. 4, pp. 27–31. (in Russ.)
4. Aliev Sh.D., Shakhmaeva A.R., Shangereeva B.A. *Sbornik tezisev dokladov XXIV itogovoy nauchnoy tekhnicheskoy konferentsii prepodavateley, sotrudnikov, aspirantov i studentov DGTU* (Collection of Abstracts of the XXIV Final Scientific Technical Conference of Teachers, Employees, Graduate Students and Students of DSTU), 21–24 April 2003, Makhachkala, pp. 87. (in Russ.)
5. Ismailov T.A., Aliev Sh.D., Shakhmaeva A.R., Shangereeva B.A. *Izmereniye, kontrol', informatizatsiya* (Measurement, Control, Informatization), Proceedings of the Scientific and Practical Conference, Barnaul, 2004, pp. 55–56. (in Russ.)
6. Patent 2005141101/28 RU, H01L 21/58, *Sposob posadki kremniyevogo kristalla na osnovaniye korpusa* (Method of Planting a Silicon Crystal on the Base of the Housing), Ismailov T.A., Shakhmaeva A.R., Shangereeva B.A. Priority 27.12.05, Published 10.12.09, Bulletin 34. (in Russ.)
7. Ismailov T.A., Shakhmayeva A.R. *Tranzistornyye struktury silovoy elektroniki* (Power Transistor Structures), St. Petersburg, 2011, 125 p. (in Russ.)
8. Harding W. *Plating*, 1965, no. 10, pp. 687.
9. Lanin V.L., Khmyl' A.A. *Nerazrushayushchiy kontrol' i sistemy upravleniya kachestvom svarykh i payanykh soyedineniy* (Non-Destructive Testing and Quality Management Systems for Welded and Soldered Joints), Workshop materials, Moscow, 1992. (in Russ.)
10. Hansen M., Anderko K. *Constitution of Binary Alloys*, NY, Mc Graw-Hill, 1958.
11. Elliott R.P. *Constitution of Binary Alloys, First Supplement*, NY, McGraw-Hill, 1965.
12. Yakovlev G.A. *Payka materialov pripoyami na osnove svintsa* (Lead-Based Soldering), Moscow, 1978. (in Russ.)
13. Lashko S.V., Lashko N.F. *Payka metallov* (Metal Soldering), Moscow, 1988, 376 p. (in Russ.)
14. Zenin V.V., Ryaguzov A., Boyko V., Galtsev V., Fomenko Yu. *Technologies in Electronic Industry*, 2005, no. 2005, pp. 46–51. (in Russ.)

15. Gruyev I.D., Matveyev N.I., Sergeyeva N.G. *Elektrokhimicheskiye pokrytiya izdeliy elektronnoy apparatury: Spravochnik* (Electrochemical Coatings of Electronic Equipment: Reference), Moscow, 1988, 304 p. (in Russ.)
16. Zenin V.V., Bokarev D.I., Segal Yu.E., Fomenko Yu.L. *Petersburg Electronic Journal*, 2002, no. 4, pp. 36–44. (in Russ.)
17. Certificate of authorship SU 1640210 A1 C25 D 3/12, Elektrolit nikelirovaniya (Nickel Plating Electrolyte), Kushner D.K., Dostanko A.P., Khmyl' A.A., Kozintsev S.I., Kacherovskaya F.B., Published 07.04.91, Bulletin 13. (in Russ.)
18. Parfenov A. *Technologies in Electronic Industry*, 2008, no. 2, pp. 46–52. (in Russ.)

Data on authors

- | | | |
|------------------------------|---|--|
| Tagir A. Ismailov | — | Dr. Sci., Professor; Dagestan State Technical University, Department of Theoretical and General Electrical Engineering |
| Aishat R. Shakhmayeva | — | PhD, Associate Professor; Dagestan State Technical University, Department of Computer Engineering |
| Biyke A. Shangereeva | — | PhD, Associate Professor; Dagestan State Technical University, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; E-mail: bijke@mail.ru |
| Tazhutdin E. Sarkarov | — | Dr. Sci., Professor; Dagestan State Technical University, Department of Theoretical and General Electrical Engineering |

For citation: Ismailov T. A., Shakhmayeva A. R., Shangereeva B. A., Sarkarov T. E. Methods for mounting crystals in the silicon transistor structures production. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 1. P. 61–69 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-1-61-69