

УДК 535.247
EDN: WXXPCK

PACS: 85-60.-q

Трансформация планарной контактной системы «припой на слое золота» при прогревах

К. С. Андрейчиков, В. П. Астахов, А. В. Ляликов, В. А. Малыгин

Изучены фронтальные картины проводящих слоев на поверхности сапфировых растров с золотыми дорожками и планарные изменения проводящих слоев в процессе прогрева. Локально нанесенные на поверхность сапфировых пластин припои двух типов изучались в процессе 4-х часовых прогревов в открытой атмосфере с поэтапным повышением температуры от 90 °С до 140 °С. В качестве припоев использовались однокомпонентный (In) и трехкомпонентный (In-Ag-Au) сплавы. Оба типа припоя (In и In-Ag-Au) показали растекание по золоту, возрастающее с повышением температуры прогрева, причем припой второго типа показал растекание в значительно большей степени. Выявлены особенности картин растекания для каждого типа припоя и определены энергии активации процесса трансформации в каждом температурном интервале. Изучен элементный состав характерных участков растекания, предложена интерпретация полученных результатов.

Ключевые слова: контактная система; растр; припой; индий; золото; хром.

DOI: 10.51368/2307-4469-2025-13-2-157-164

Введение

Для изделий микро- и фотоэлектроники в процессе сборки гибридных узлов применяются специальные сапфировые растры с токопроводящей системой из контактных проводников для монтажа и распайки кристаллов. Контактная система, как правило, наносится на сапфировую пластину в виде растра из уз-

ких близкорасположенных параллельных токопроводящих дорожек, разводящих выводы изделия, образуя контактные площадки. К такой разводящей системе предъявляются высокие требования по коррозионной стойкости, механическим и электрическим свойствам, надежности. Учитывается, что припои на основе индия превосходят по качеству оловянные сплавы, поэтому в ряде работ (см. например, [1–4]) проводились исследования микросоединений индия с золотом, выбранным в качестве материала для изготовления токопроводящих дорожек, поскольку смачиваемость золота индием является наилучшей вследствие химической инертности золота и его неокисляемости. Установлено, что в тонкопленочных соединениях индия с золотом существуют две основные фазы: Au_7In_3 и Au , а также в малых количествах интерметаллиды AuIn_2 , $\text{Au}_{10}\text{In}_3$ и Au_9In_3 . В микросоединениях, где индий много толще золота, обнаружены только интерметаллид AuIn_2 и In . Данные получены при прогревах пленочных структур при температурах (100–250) °С в течение

Андрейчиков Кирилл Сергеевич¹, инженер-технолог.
E-mail: andreichikoff.kirill@yandex.ru

Астахов Владимир Петрович¹, гл. специалист, д.т.н.

Ляликов Алексей Владимирович², вед. инженер.

Малыгин Владислав Алексеевич², инженер 2 кат.

¹ АО «МЗ «Сапфир».

Россия, 117545, Москва, Днепропетровский проезд, 4А, стр. 3А.

² АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

Статья поступила в редакцию 24.03.2025

После доработки 11.04.2025

Принята к публикации 16.04.2025

Шифр научной специальности: 2.2.2

© Андрейчиков К. С., Астахов В. П., Ляликов А. В., Малыгин В. А., 2025

(1–30) минут. Отмечено, что в парах Au-In самой быстрой является реакция образования интерметаллида AuIn₂ с энергией активации 0,23 эВ. При этом индий растет на золоте, эпитаксиально повторяя его структуру, по механизму Франка-Ван-дер-Мерве (слой-за-слоем).

В литературе данные о планарных изменениях проводящих слоев в процессе неконтролируемо проводимых низкотемпературных прогревов локального контакта «припой на слое золота» в настоящий момент отсутствуют. Данная работа направлена на получение такой информации. При этом выбраны два типа наиболее широко используемых припоев: однокомпонентный (In) и трехкомпонентный (In-Ag[3%]-Au[2%]) сплав, применяемый для контактной пайки, поскольку тонкий слой золота может раствориться в припое, что часто наблюдается при длительных эксплуатации и хранении в случае индиевого припоя. Изучены контактные системы, сформированные на полированной сапфировой пластине в конфигурации, применяемой для глубокоохлаждаемых фотоприемников и, в частности, фоторезисторов и светодиодов на основе антимонида индия.

Методика проведения эксперимента

Объектами изучения являлись сапфировые растры, содержащие по 68 параллельных дорожек на основе слоя золота толщиной ~0,5 мкм с подслоем хрома толщиной 0,08 мкм, ширина дорожек составляла 800 мкм, зазор между дорожками – 100 мкм. На небольшие участки дорожек (~0,5–1) мм одной группы растров микропаяльником наносили индиевый припой, а на растры другой группы наносили трехкомпонентный припой. Растры одновременно последовательно прогревали в открытой атмосфере в течение 4-х часов, поэтапно повышая температуру прогрева от 90 до 140 °С через каждые 10 °С. Конечная температура, которая составила 140 °С, выбралась из условия недопущения расплава припоев ($T_{\text{пл}}^{\text{In}} = 156,6$ °С; $T_{\text{пл}}^{\text{In-Ag-Au}} = 147$ °С). После каждого этапа прогрева проводили исследования образцов обоих типов на металлографическом микроскопе с цифровой камерой «Olympus BX51M» при увеличении 100 крат, позволя-

ющем получить изображение как области с изначально нанесенным припоем, так и протяженную соседнюю область токоведущей дорожки.

С помощью стилусного профилометра «Dektak 150+» для растров двух типов измерены профили поверхности переходных участков – от вершины припоя до его планарной границы с золотом. На растровом электронном микроскопе «ThermoFisher PrismaE» с приставкой энергодисперсионного рентгено-спектрального микроанализа «EDAX Element» получены изображения зондируемых участков контактной системы во вторичных электронах (энергия электронов зондирующего пучка составила 20 кэВ). Исследованы спектры химического состояния, на основе которых сформированы качественные карты распределения химических элементов, обнаруженных по площади поверхности золотой дорожки, вошедших в таблицу содержания химических элементов в характерных областях.

Результаты эксперимента

При проведении прогревов сапфировых растров двух типов с индиевым и трехкомпонентным припоями наблюдаемые изменения контактных систем можно представить следующим образом. На начальных этапах прогревов на планарной границе между припоем и токоведущей дорожкой (Au) возникают образования, увеличивающиеся и срастающиеся по мере увеличения температуры и/или времени прогрева в сплошную «темную рамку» вокруг припоя. Дальнейшие прогревы увеличивают ширину «рамки», которая распространяется по дорожке на все большие расстояния от начальной планарной границы припоя.

В случае индиевого припоя выдержка при температуре 90 °С не вызывает заметного сдвига планарной границы припой-золото, и только после прогрева при 100 °С «рамку» становится возможным измерить (ее ширина достигает 1,5+2,5 мкм). При дальнейших прогревах ширина «рамки» увеличивается, вырастая на последнем этапе до – 145 мкм. Характерно, что часть «рамки», прираставшая при 140 °С, имеет периодический черно-белый контраст с приблизительно одинаковой шириной полос. Фотографии, полученные по-

сле первого и последнего этапов прогрева с индиевым припоем, представлены на рис. 1. На рис. 1б видна внутренняя темная сплошная «рамка», вырастающая при температурах прогрева ниже $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ и значительно более широкая внешняя «рамка» с периодическим черно-белым контрастом, образовавшаяся при $140\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В случае трехкомпонентного припоя сразу после прогрева при $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ можно наблюдать образовавшуюся сплошную темную «рамку» шириной $2,5\div 5\text{ }\mu\text{m}$, скорость расширения которой при дальнейшем увеличении темпера-

туры значительно выше, чем у индиевого припоя. Ширина «рамки» продолжает расти до $700\div 900\text{ }\mu\text{m}$, причем после прогрева при $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ она выходит из поля зрения микроскопа при 100-кратном увеличении, поэтому фотография последнего этапа сделана при 50-кратном увеличении. Фотографии после первого и последнего этапов прогрева растворов с трехкомпонентным припоем представлены на рис. 2. Эти данные не фиксируют переменного контраста, как в случае индиевого припоя, однако наблюдается выраженная зернистость «рамки».

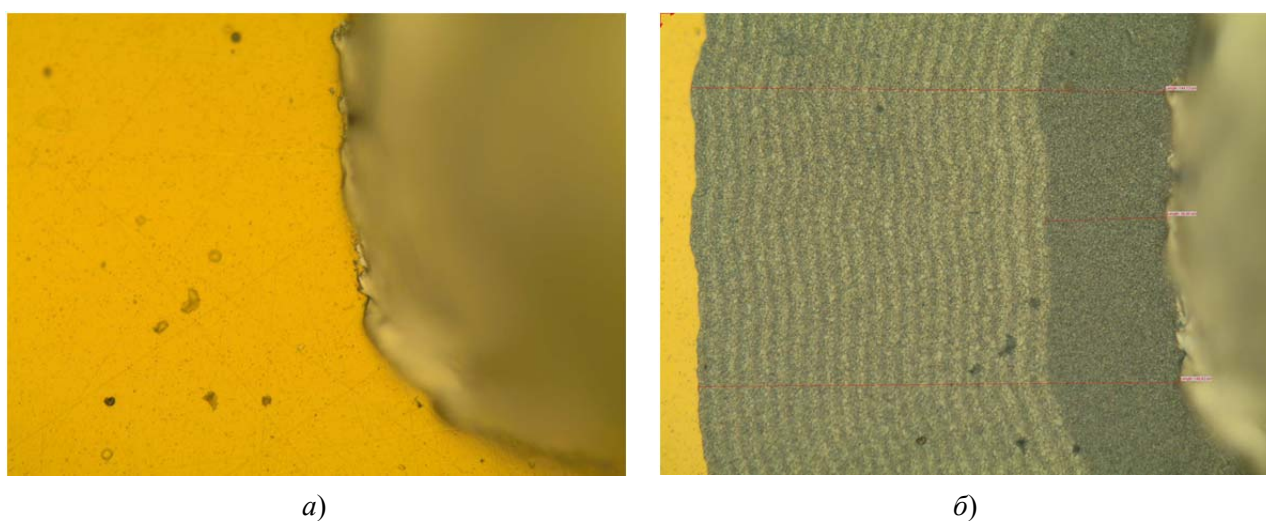


Рис. 1. Фотографии областей вблизи планарной границы капли индиевого припоя с золотой контактной дорожкой после первого (а) и последнего (б) этапов прогрева ($M = 100\times$)

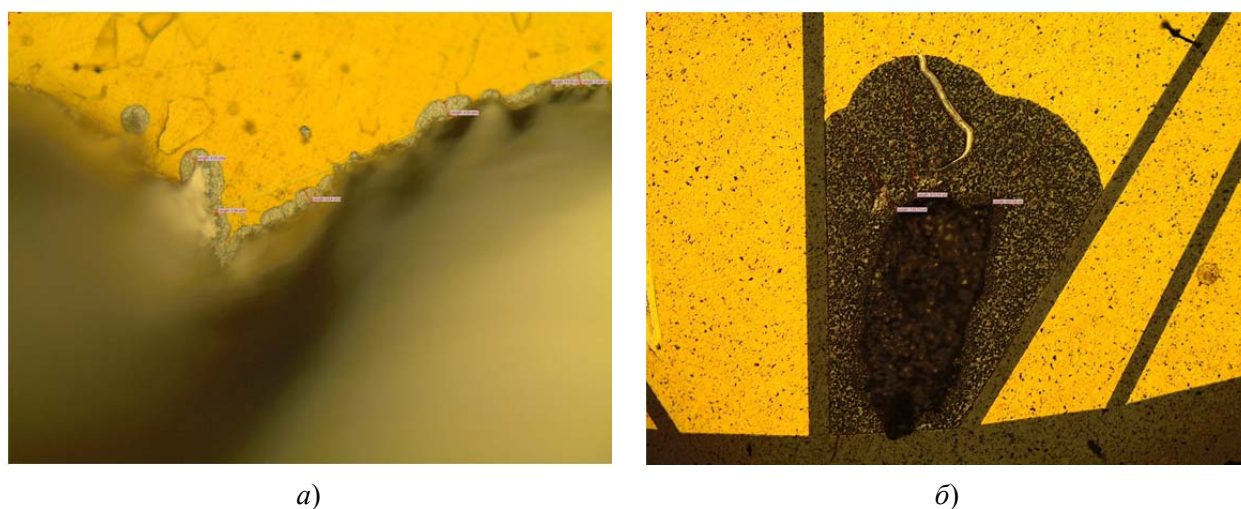


Рис. 2. Фотографии областей вблизи планарной границы капли трехкомпонентного припоя с золотой контактной дорожкой после первого (а) и последнего (б) этапов прогрева, а) – $M = 100\times$, б) – $M = 50\times$

Данные по приращению ширины «рамки» при увеличении температуры прогрева для обоих типов припоя и всех температур прогрева представлены в табл. 1 вместе с результатами расчетов энергии активации процессов образования «рамки» на каждом этапе прогрева.

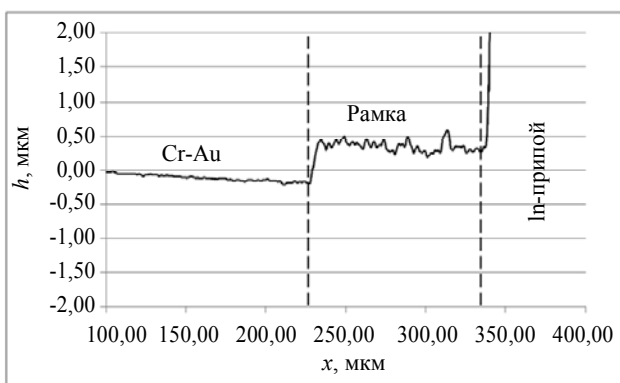
Полученные с помощью профилометра профили поверхности (рис. 3) показывают, что образовавшиеся «рамки» вокруг индиевого и трехкомпонентного припоев различаются. Вокруг индиевого припоя «рамка» выглядит мелкозернистой и более плотной, что на про-

филе поверхности отражается меньшими перепадами высот (рис. 3а), в отличие от крупнозернистой и рыхлой «рамки» (рис. 3б), образованной трехкомпонентным припоем. При этом толщина слоя «рамки» в случае трехкомпонентного припоя (~1,5 мкм) в ~3 раза больше, чем в случае индиевого припоя (~0,5 мкм). Следует отметить, что на внешней части «рамки» с периодическим контрастом вокруг индиевого припоя, выросшей при 140 °С (см. рис. 1б), данные профилометра не фиксируют каких-либо изменений, соответствующих контрасту (ср. данные рис. 1б и 3а).

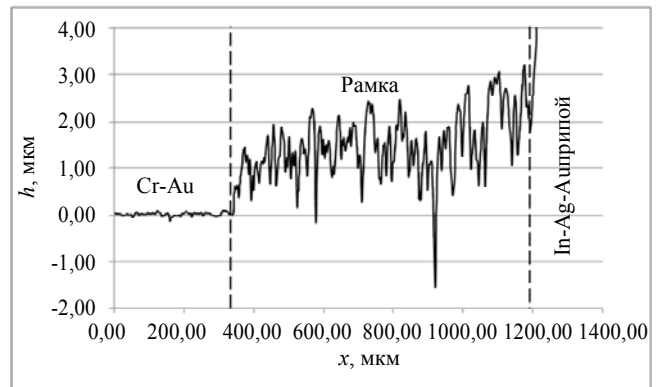
Таблица 1

Ширины «рамок» (L) и энергии активации этого процесса (растекания) для обоих припоев ($E_{\text{акт}}$) на каждом этапе прогрева

Последовательные этапы прогрева по 4 часа	Индиевый припой		«Тройной» припой	
	L , мкм	$E_{\text{акт}}$, эВ	L , мкм	$E_{\text{акт}}$, эВ
90 °С	< 1	–	4	–
100 °С	~ 2	0,809	24	2,091
110 °С	4	0,853	62	1,168
120 °С	13	1,529	169	1,279
130 °С	37	1,428	471	1,399
140 °С	145	1,959	767	0,699



а)



б)

Рис. 3. Профили поверхности областей вблизи планарной границы индиевого (а) и трехкомпонентного (б) припоев после всех прогревов

Растровые электронные изображения во вторичных электронах границы между припоями обоих типов и золотой дорожкой с возникшими «рамками» и карты распределения обнаруживаемых элементов в составе припоев по поверхности, полученные при сканирова-

нии участков «рамки», после всех прогревов, представлены на рисунке 4. На них указаны области: 1 – первоначального нанесения припоев, 2 – образовавшихся «рамок», 3 – приграничной области золотой контактной дорожки.

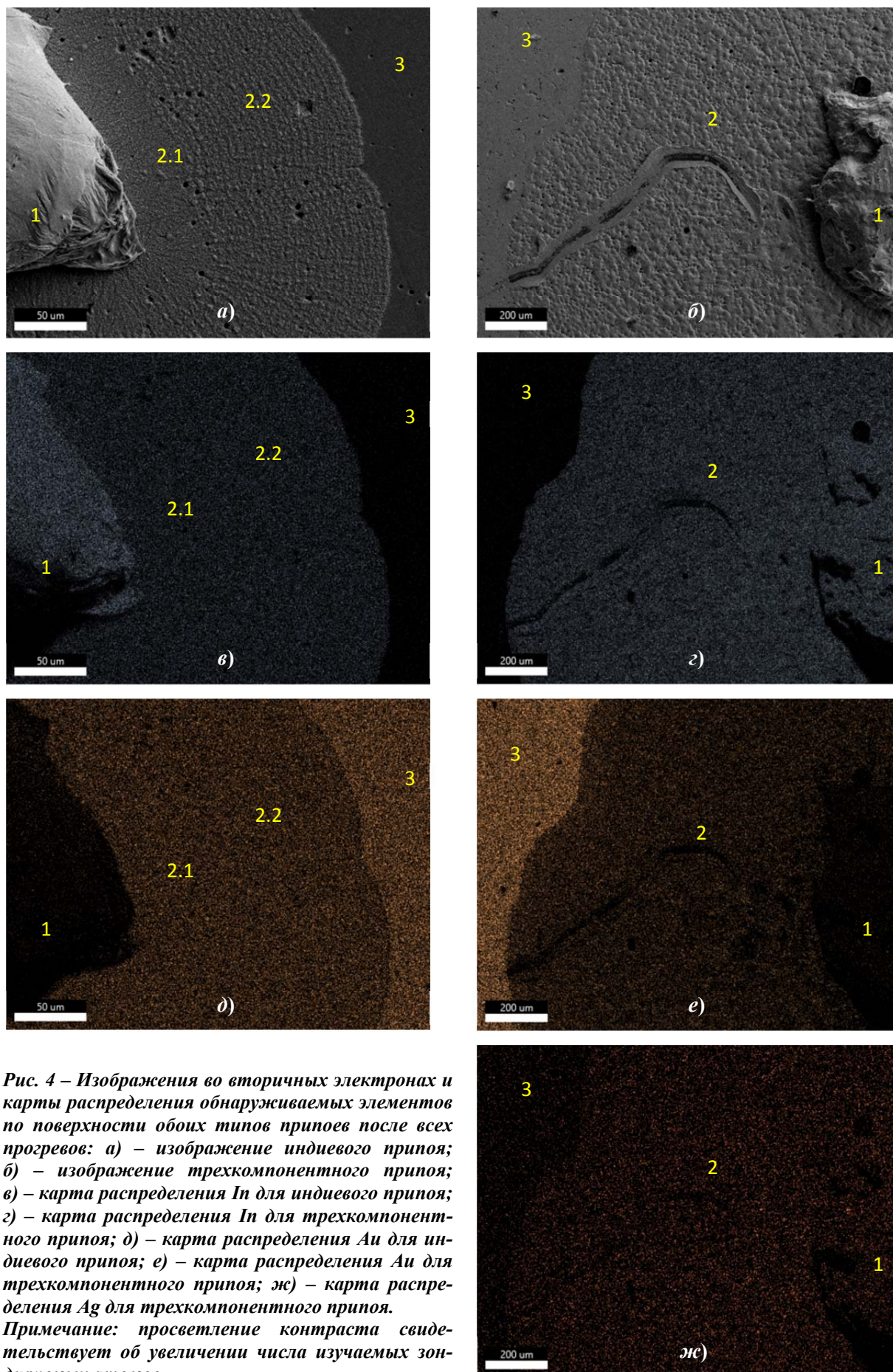


Рис. 4 – Изображения во вторичных электронах и карты распределения обнаруживаемых элементов по поверхности обоих типов припоев после всех прогревов: а) – изображение индиевого припоя; б) – изображение трехкомпонентного припоя; в) – карта распределения In для индиевого припоя; г) – карта распределения In для трехкомпонентного припоя; д) – карта распределения Au для индиевого припоя; е) – карта распределения Au для трехкомпонентного припоя; ж) – карта распределения Ag для трехкомпонентного припоя.
Примечание: просветление контраста свидетельствует об увеличении числа изучаемых зондируемых атомов

В случае индиевого припоя область 2 разделяется на области 2.1 и 2.2, соответствующие сплошной внутренней «рамке», образовавшейся в течение первых пяти этапов прогрева от 90 до 130 °С, и внешней «рамке» с периодическим светло-темным контрастом, образовавшейся на последнем этапе прогрева при 140 °С.

На участках, где на рис. 4 проставлены номера областей, получены спектры элементного состава, данные о которых для обоих типов припоя представлены в табл. 2. Из табл. 2 следует, что в области «горки» припоя (область 1) на образце с индиевым припоем ожидается преобладает индий. В области 1 на образце с трехкомпонентным припоем, помимо преобладающего индия, присутствует углерод, что, скорее всего, является артефактом, а также элементы припоя Ag и Au, которые отображаются на картах распределения этих элементов по поверхности (см. рис. 4е и 4ж). Практически во всех областях фиксируются золото дорожки, хром подслоя золота, а также атомы алюминия и кислорода сапфирового

растра, что объясняется прохождением электронного пучка в глубинные области образцов, которыми являются подслоя золота – хром – и приповерхностная область пластины сапфира.

В областях 2.1 и 2.2 индиевого припоя по сравнению с областью 1 наблюдается снижение содержания индия с одной стороны, и повышение содержания золота с другой – т. е. индий распространяется из места своего первоначального нанесения по золотой дорожке. Та же тенденция наблюдается и в области 2 трехкомпонентного припоя. Отличие между областями 2.1 и 2.2 состоит лишь в проявившемся в области 2.2 небольшом количестве кислорода, в то время как соотношение индия и золота в этих областях близко. Также не наблюдается периодического изменения концентрации индия или золота (см. рис. 4в и 4д), которые соответствовали бы световому контрасту области 2.2 рис. 1б и рис. 4а.

В области 3 на растрах с обоими типами припоев закономерно преобладает золото, отделенное от «рамки» четкой границей.

Таблица 2

Содержание химических элементов в указанных на рис. 4 областях

Индиевый припой			«Тройной» припой		
Хим. элемент	Весовые %	Атомные %	Хим. элемент	Весовые %	Атомные %
Область 1			Область 1		
Cr	0,7	1,6	C	5,7	36,6
In	95,2	96,0	In	94,3	63,4
Au	4,1	2,4			
Область 2.1			Область 2		
Cr	5,8	14,4	O	2,9	19,5
In	50,2	56,6	Cr	1,2	2,5
Au	44,1	29,0	Ag	2,0	2,0
Область 2.2			In	65,1	60,5
O	1,7	12,2	Au	28,8	15,6
Cr	6,0	13,4			
In	46,5	47,3			
Au	45,8	27,1			
Область 3			Область 3		
Al	3,8	14,6	O	0,3	2,3
Cr	24,1	47,7	Al	2,8	11,5
Au	72,0	37,6	Cr	20,4	43,3
			Au	76,5	42,9

Обсуждение результатов эксперимента

Из представленных данных следует, что при длительных (4 часа) прогревах при температурах (90÷140) °С не смотря на более низкие температуры, чем температуры плавления припоев, происходит их растекание по золотому слою токопроводящей дорожки со скоростью, пропорциональной температуре прогрева. Такой растекшийся слой образует вокруг первоначальной границы припоя темную «рамку», основой которой является индий. Высота «рамки», образующейся при 140 °С, в случае индиевого припоя составляет ~0,5 мкм, а в случае трехкомпонентного припоя ~1,5 мкм. Причем в первом случае «рамка» состоит из двух составляющих: внутренней сплошной темной «рамки» и внешней более широкой с чередующимися темными и светлыми контрастными полосами приблизительно одинаковой ширины. Во втором случае рамка является единой сплошной, но более рыхлой, зернистой и гораздо (в ~6 раз) более широкой.

Такое отличие растекания и его результатов для двух рассматриваемых типов припоя можно объяснить исходя из следующих соображений. Известно об активном растворении золота в индии и, как следует из представленных данных, в этом случае скорость растекания индия по золоту меньше, чем скорость растекания трехкомпонентного припоя, содержащего ~2 % золота. Из этого следует, что процесс растворения золота в индии сдерживает растекание припоя по золоту. Это объясняет и повышенное растекание трехкомпонентного припоя (ограничено растворение золота дорожки) и появление контрастных полос на второй стадии растекания индиевого припоя, когда скорости растекания на некоторых соседних участках отличаются. Действительно, когда доза «свежего» припоя стекает на золото, то она задерживается из-за начавшегося активного растворения золота. После достаточного насыщения золотом эта доза припоя «быстро» перетекает дальше, пропуская над собой следующую дозу ненасыщенного золотом припоя, которая также приостановится на период достаточного насыщения

золотом, а затем более активно перетекает дальше и т. д. Так образуется контраст между участками быстрого и медленного растекания, который обнаруживается фотокамерой (рис. 1б) и не обнаруживается профилометром (рис. 3а).

Если считать, что представленные в табл. 1 данные по приращению ширины «рамки», полученные при одинаковой длительности, но при разных температурах прогрева, соответствуют закону Аррениуса, то эти данные можно обобщить приближенной формулой:

$$L = A \cdot \exp\left(-\frac{E_{\text{акт}}}{kT}\right)$$

где L – приращение ширины рамки, см; A – единый конструкционно-технологический фактор; $E_{\text{акт}}$ – энергия активации растекания, эВ; k – постоянная Больцмана, эВ·К; T – температура, К.

Исходя из этой формулы были рассчитаны значения энергии активации растекания на каждом этапе прогрева для обоих типов припоя и эти данные также представлены в табл. 1. Из этих данных следует, что энергия активации растекания обоих типов припоя возрастает с температурой и это можно объяснить увеличением скорости растворения золота в припое, являющегося тормозящим фактором для растекания припоя. Резкое уменьшение $E_{\text{акт}}$ при 140 °С в случае трехкомпонентного припоя объясняется его размягчением за счет приближения к более низкой температуре плавления, чем в случае индиевого припоя.

Заключение

Полученные в работе данные свидетельствуют о том, что при проектировании микроэлектронных устройств с поверхностным монтажом на платах с плотноупакованными золотыми токопроводящими дорожками и контактными площадками при использовании локальной пайки припоями на основе индия следует учитывать факт растекания капли припоя по золоту при низкотемпературных

прогревах и, следовательно, при длительном хранении, а также выявленные в работе особенности этого растекания, которое может служить причиной деградации параметров и снижения срока службы устройств из-за неконтролируемых замыканий. Наиболее неблагоприятны в этом смысле припой, слабо растворяющие в себе золото.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shieu F. S., Chang Z. C., Sheen J. W., Chen C. W. / Intermetallics. 2000. № 8. P. 623–627.
2. Bernstein L. / Journal of the Electrochemical Society. 1966. Vol. 113. № 12. P. 1282–1288.
3. Chang J. C., Lu F. H., Shieu F. S. / Materials Chemistry and Physics. 2001. Vol. 70. P. 137–143.
4. Bernstein J., Barholomew H. / Trans. AJME. 1966. Vol. 236. P. 405.

PACS: 85-60.-q

Planar transformation of a local contact system “solder on gold layer” during lowtemperature heat treatment

K. S. Andreychikov¹, V. P. Astahov¹, A. V. Lyalikov² and V. A. Malygin²

¹ Moskovsky zavod «SAPFIR». J.S.C.
Bld. 4A, 3A, Dneprohetrovskiy passage, Moscow, 117545, Russia
E-mail: andreichikoff.kirill@yandex.ru

2RD&P Center ORION, JSC
9, Kosinskaya st., Moscow, 111538 Russia

Received 24.03.2025; revised 11.04.2025; accepted 16.04.2025

The study examined the changes in the frontal patterns of two types locally applied solders on a gold track during 4-hour heat treatments in an open atmosphere with a stepwise increase in temperature diapason from 90 °C to 140 °C. It was two types of solders: onecomponents (In) and threecomponents (In-Ag-Au). Both types of solders demonstrated a significant increase in the spreading process over gold, depending on the temperature, time and nature of the solder. The peculiarities of the energy activation this process were identified for each type of solder. The elemental composition of the areas of spreading characteristic for the obtained results was studied. An interpretation of the obtained results is proposed.

Keywords: semiconductor devices; contact systems; solders; indium; gold; chromium.

REFERENCES

1. Shieu F. S., Chang Z. C., Sheen J. W. and Chen C. W., Intermetallics, № 8, 623–627 (2000).
2. Bernstein L., Journal of the Electrochemical Society **113** (12), 1282–1288 (1966).
3. Chang J. C., Lu F. H. and Shieu F. S., Materials Chemistry and Physics **70**, 137–143 (2001).
4. Bernstein J. and Barholomew H., Trans. AJME **236**, 405 (1966).