

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.396.6:621.791.16

doi: 10.30987/2782-5957-2024-3-70-84

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ НА ДЕГРАДАЦИЮ СОЕДИНЕНИЙ В СИСТЕМЕ Al – Au

Константин Васильевич Макаренко¹, Ирина Александровна Котлярова^{2✉}

^{1,2} Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

¹ makkon1@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7195-0500>

² ikotlyarova@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6162-0199>

Аннотация

Рассмотрены типичные причины деградации микросварных биметаллических соединений бинарной системы алюминий – золото. Данные типы соединений часто применяются в производстве полупроводниковых изделий (ППИ) и интегральных микросхем (ИМ). Деградация соединений, проявляющаяся при отбраковочных испытаниях или в процессе эксплуатации изделий, приводит к появлению отказов, что резко снижает надежность радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). В основе большинства деградационных процессов лежат явления диффузии, которые преимущественно определяются температурой, химическим составом и микроструктурой металлов и сплавов. Примесные элементы, входящие в состав золотого покрытия, оказывают существенное влияние на деградацию проволочных соединений «контактные площадки

кристалла – траверсы выводов корпуса» ППИ. В этой связи представляется интересным проанализировать влияние различных примесей на процессы диффузии и изменение микроструктуры покрытия для выявления наиболее опасных химических элементов и определения их роли в механизмах деградации соединений. В статье представлен обзорный анализ литературных данных по теме исследования. В заключении обобщены результаты работ в области анализа влияния примесных элементов на деградацию соединений в системе Al – Au, сделаны выводы о решающей роли зернограницевой диффузии на механизмы деградации микросварных биметаллических соединений.

Ключевые слова: золотое покрытие, примесь, алюминиевая проволока, эффект Киркендалья, деградация, отказ, надежность.

Ссылка для цитирования:

Макаренко К.В. Влияние примесей на деградацию соединений в системе Al – Au / К.В. Макаренко, И.А. Котлярова // Транспортное машиностроение. – 2024. – №3. – С. 70-84. doi: 10.30987/2782-5957-2024-3-70-84.

Original article

Open Access Article

INFLUENCE OF IMPURITIES ON THE DEGRADATION OF COMPOUNDS IN Al – Au SYSTEM

Konstantin Vasiliyevich Makarenko¹, Irina Aleksandrovna Kotlyarova^{2✉}

^{1,2} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

¹ makkon1@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7195-0500>

² ikotlyarova@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6162-0199>

Abstract

Typical reasons for degradation of micro-welded bimetallic compounds of the aluminum-gold binary system are considered. These types of compounds are often used in the manufacture of semiconductor products (SCPs) and integrated circuits (ICs). Degradation of compounds, revealed during screen tests or during products operating, leads to failures, which dramatically reduces the reliability of electronic

equipment (EE). The majority of degradation processes are based on diffusion phenomena, which are mainly determined by temperature, chemical composition and microstructure of metals and alloys. Impurity elements included in the gold coating have a significant effect on the degradation of the wire connections such as crystal contact pads – traverses of package terminals of SCPs. In this regard, it is worth analyzing the effect of various

impurities on the diffusion processes and changes in the microstructure of the coating in order to find out the most dangerous chemical elements and determine their role in the degradation of compounds. The paper presents a review of references on the research subject. In the conclusion, the results of analysis in the field of the influence of impurity elements on the degradation

of compounds in Al – Au system are summarized, conclusions are drawn about the key role of grain-boundary diffusion on the degradation of micro-welded bimetallic compounds.

Keywords: gold coating, impurity, aluminum wire, Kirkendall effect, degradation, failure, reliability.

Reference for citing:

Makarenko KV, Kotlyarova IA. Influence of impurities on the degradation of compounds in Al – Au system. *Transport Engineering*. 2024;3:70-84. doi: 10.30987/2782-5957-2024-3-70-84.

Для получения соединений в полупроводниковых изделиях (ППИ) и интегральных микросхемах (ИМ), в частности, для образования связи между контактными площадками кристаллов и траверсами выводов корпуса применяют монометаллические и биметаллические контакты. При этом в производстве радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) широко используют металлы алюминий и золото, которые применяют в виде металлизированных покрытий или проволок. Соединения типа Al – Al и Au – Au классифицируют как монометаллические, а Al – Au – биметаллические [1].

В системе биметаллических соединений Al – Au возникают деградационные явления, обусловленные образованием интерметаллических фаз типа Au_xAl_y [2]. Деградация соединений проявляется в увеличении электрического сопротивления в зоне биметаллического соединения, резком уменьшении его прочности, и является частой причиной отказов РЭА [3]. Интерметаллические соединения, в частности $AuAl_2$ имеют пурпурный оттенок, который в виде каймы образуется в месте контакта двух металлов, поэтому данное явление получило название «пурпурной чумы» [4].

В основе механизма явления «пурпурной чумы» лежит эффект Киркендалла [5]. Он обусловлен взаимной диффузией образующих соединений металлов, при этом коэффициенты диффузии двух металлов различны [6]. В системе Al – Au больший коэффициент диффузии имеет Au, что приводит к тому, что именно в золоте на определенной глубине образуются поры, именуемые «пустоты Киркендалла» [7]. Возникновение дефектной зоны в кристаллической решетке золота, представленной «пустотами Киркендалла», ослаб-

ляет прочность соединения и способствует росту электрического сопротивления [8]. Это позволяет сделать вывод о том, что эффект Киркендалла играет ведущую роль в процессах деградации соединений в системе Al – Au.

Так как в основе эффекта Киркендалла лежат диффузионные процессы, важно определить какие факторы оказывают наиболее существенное влияние на развитие данных процессов. Во-первых, безусловно, наиболее важным фактором является температура, которая посредством закона Аррениуса регламентирует скорость развития процессов самодиффузии золота [9]. Во-вторых, структура металлов, в зависимости от степени ее дефектности, будет способствовать развитию диффузионных процессов. В этой связи необходимо отметить, что в поликристаллических металлах всегда присутствуют так называемые пути ускоренной диффузии, которые представлены прежде всего границами зерен, линейными дефектами кристаллического строения (дислокации различного типа и дисклинации) и протяженными пространственными дефектами типа пор и агрегатированных точечных дефектов. Известный факт [10], наиболее интенсивно протекают диффузионные процессы именно по границам зерен, что свойственно мелкозернистым материалам с развитой системой границ зерен. В-третьих, еще одним важным фактором являются примесные элементы, которые могут повышать термодинамическую активность атомов золота, исказить кристаллическую решетку и оказывать прочие воздействия, интенсифицирующие диффузионные процессы и способствующие деградации соединений в системе Al – Au.

Именно последний третий фактор является наиболее сложным, по причине многообразия возможных примесных элементов, и наименее изученным, из-за сложности процесса определения их концентрации (она может составлять несколько частей на миллион) и разнообразности явлений, на которые они могут влиять. Механизмы деградации, как было отмечено ранее, являются частой причиной отказов, что сказывается на снижении надежности ППИ и ИМ, как следствие производители РЭА несут существенные репутационные и экономические потери. В этой связи тема оценки влияния примесных элементов на процессы деградации в системе Al – Au является безусловно актуальной.

Целью статьи является анализ литературных данных для выявления степени влияния различных примесных элементов,

которые, присутствуя в золотом покрытии ППИ и ИМ, могут оказывать влияние на развитие деградационных процессов в соединениях системы Al – Au.

Первое объяснение разрушения соединений из-за наличия примесей в золотом покрытии было представлено в классической работе С. Horsting «Пурпурная чума и чистота золота» [11]. Автор отметил, что некоторые примеси в покрытии приводят к образованию пустот по механизму Киркендалла и раннему разрушению соединений. Он предположил, что в чистых золотых покрытиях (без примесей) фронт диффузии образующихся интерметаллидов движется через золото к никелю, при этом образующиеся фазы в сплаве располагаются следующим образом, представленном на рис. 1 a ; связь при этом на границе золото – алюминий остается достаточно прочной.

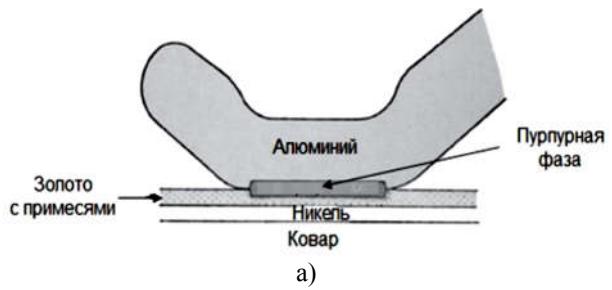
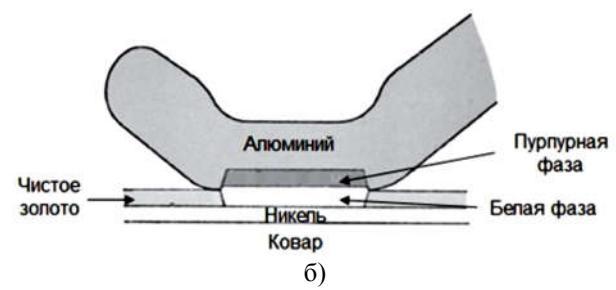


Рис. 1. Схематическое изображение влияния диффузии при повышенной температуре, приводящее к разделянию интерметаллических фаз и разрушению соединения (а). Результаты соединения алюминиевой проволоки с покрытием из чистого золота (б) [11]

Fig. 1. Schematic representation of diffusion influence at elevated temperature, leading to the separation of intermetallic phases and the destruction of the compound (a). The results of the connection of an aluminum wire with a pure gold coating (b) [11]



Однако, в случае использования «загрязненного» золота, примеси перемещаются впереди фронта диффузии интерметаллидов, так как большинство примесей имеют меньшую растворимость в интерметаллическом соединении, чем в Au или Al (рис. 1 b). При некоторой критической концентрации примесей происходит их осаждение (формируется дефектная кристаллическая решетка с большим количеством пустот «вакансий» и «дивакансий»), и частицы примесей (источники вакансий) действуют как стоки для вакансий в кристаллической решетке золота, образующихся в ходе диффузии. Пустоты развиваются и объединяются в более крупные

агрегаты, это приводит к разрушению соединения.

Ранние методы анализа примесей, доступные С. Horsting во время исследований, были ограничены спектрографическим и «довольно грубым» титриметрическим количественным химическим анализом. Он не смог определить конкретную примесь, вызвавшую проблему, но обнаружил, что «загрязненные» покрытия золота преимущественно содержали Ni, Fe, Co, В и другие элементы, но в меньших количествах [12].

Профессор В.В. Зенин с соавтором [13] расширил этот список: Pb, Zn, Ta, Te, S, Co, Fe и др. Он отмечал, что указанные

примеси существенно ускоряют диффузионные процессы в соединениях Al – Au, что способствует их деградации.

В настоящее время разделяют следующие источники загрязнений золотого покрытия:

- примеси, попавшие в гальваническое золотое покрытие из электролита;
- диффундирующие в покрытие из подложки;

Примеси, попавшие в гальваническое золотое покрытие из электролита

Гальванические ванны для золочения, предназначенные для осаждения электролитических покрытий, обычно состоят из золотосодержащего химического соединения, а также различных функциональных добавок в запатентованных смесях электролитов. Основой для электролитов золочения являются цианистый калий или железисто-синеродистый калий [14].

- представленные загрязнениями на границе раздела Al – Au;
- продиффундировавшие в покрытие из полимерных корпусов ППИ и ИМ.

Рассмотрим более детально данные источники примесей с конкретизацией химических элементов, их критической концентрацией и механизмы их негативного воздействия на процессы деградации соединений Al – Au.

Осаждение золота из цианистых щелочных электролитов

Осаждение золота из цианистых щелочных электролитов протекает при большой катодной поляризации, обуславливающей их высокую рассеивающую способность и формирующую мелкокристаллическую структуру катодных осадков [15]. Наиболее широко используемые в отечественной практике золочения составы электролитов представлены в таблице.

Таблица
Составы рекомендуемых растворов для золочения (в г/л) по данным [15 и ГОСТ 9.305-84]
Table
Compositions of recommended solutions for gilding (in g/l) according to [15 and GOST 9.305-84]

Компоненты в условиях осаждения	№ раствора электролита			
	1	2	3	4
KAu(CN) ₂	7 – 12	8 – 12	8 – 12	6 – 8
Цитрат калия	70	150	60 – 70	
Лимонная кислота	60 – 100	18 – 20	20 – 30	120
K ₂ HPO ₄ ·12H ₂ O	–	35 – 50	–	–
TlSO ₄	–	0,0007	–	–
Цитрат кобальта	–	–	0,5 – 2	–
Цитрат никеля	–	–	–	1 – 3
pH	3,8 – 5,0	6,5 – 7,5	3,9 – 4,2	4,2 – 4,6
Температура, °C	45 – 55	60 – 80	35 – 40	20 – 40
Плотность тока, А/дм ²	0,6 – 0,8	0,8 – 1,2	1,0 – 1,5	0,5 – 0,8
Скорость осаждения, мкм/мин	0,13 – 0,25	0,2 – 0,4	–	–

Для улучшения оптических характеристик (блеска и оттенка), а также механических и эксплуатационных свойств золотых покрытий (твердости и износстойкости), в цианистый золотой электролит добавляются различные металлы, в частности, металлы группы железа (никель и кобальт, см. растворы электролитов № 3 и 4 в таблице).

Таллий, свинец и мышьяк обычно добавляют в растворы электролитов в качестве модификаторов (измельчителей) зерна и для ускорения процесса осаждения

покрытий, а также для изменения морфологии поверхности, которая определяет оптические свойства. Доказательством использования электролитов с таллием в качестве ускорителя при осаждении золотого покрытия может служить сравнение скоростей осаждения золота из различных электролитов, представленных в карте № 39 по ГОСТ 9.305-84 «Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Операции технологических процессов получения покрытий». Из сравнительного анализа скоростей осаждения именно

состав № 2 раствора электролита, представленный в таблице 1 и использующий в качестве добавки сернокислый таллий ($TlSO_4$), обеспечивает скорость осаждения 0,2...0,4 мкм/мин. В то время как при использовании базового раствора электролита № 1 она не превышает 0,25 мкм/мин.

Таллий (Tl) был идентифицирован первым и до сих пор является наиболее часто упоминаемой в литературе примесью, вызывающей проблемы в соединениях алюминиевой проволоки с золотым покрытием [16 – 21]. Таллий в золотых покрытиях был впервые идентифицирован как источник разрушения проволочных соединений с помощью спектрального анализа Оже-электронов [12]. При этом его концентрация в золотом покрытии составила около 30 ppm (Ppm или миллионная доля – единица измерения концентрации, аналогична по смыслу проценту или промилле, представляет собой одну миллионную долю, т.е. 100 ppm = каждый килограмм смеси содержит 100 мг этого вещества или 0,01 %).

При таких относительно низких концентрациях таллия, при которых он содержится в золотых осадках, его невозможно было обнаружить классическими химическими (титрованием и гравиметрией), обычными спектрографическими или рентгеновскими микрозондовыми методами [22]. Однако, даже при такой относи-

тельно малой концентрации, содержание Tl было достаточно для ухудшения соединения алюминиевой проволоки с золотым покрытием. Автором [19] было обнаружено, что Tl может переноситься на проволоку из загрязненного им золотого покрытия с образованием разрыва металлизации в области соединения. Предлагаемое объяснение состояло в том, что таллий быстро диффундировал во время образования сварной точки между золотом и алюминием и концентрировался на границах зерен, где в последующем образовывал легкоплавкую эвтектику. Здесь необходимо пояснить, основываясь на анализе диаграммы состояния Au – Tl (рис. 2), условия образования эвтектики в системе [23]. Золото с таллием образуют диаграмму состояния простого эвтектического типа, с температурой плавления эвтектики 131 °C. То есть при большинстве температурных испытаний по границам зерен, где концентрация таллия повышенена в результате зернограничной диффузии этого элемента, будет происходить образование жидкой фазы, безусловно ослабляющей соединение. При этом, как следует из анализа диаграммы (рис. 2), концентрация таллия в золоте может быть чрезвычайно мала, и в таких условиях все равно происходит формирование легкоплавкой эвтектики ((Au) + (α Tl)).

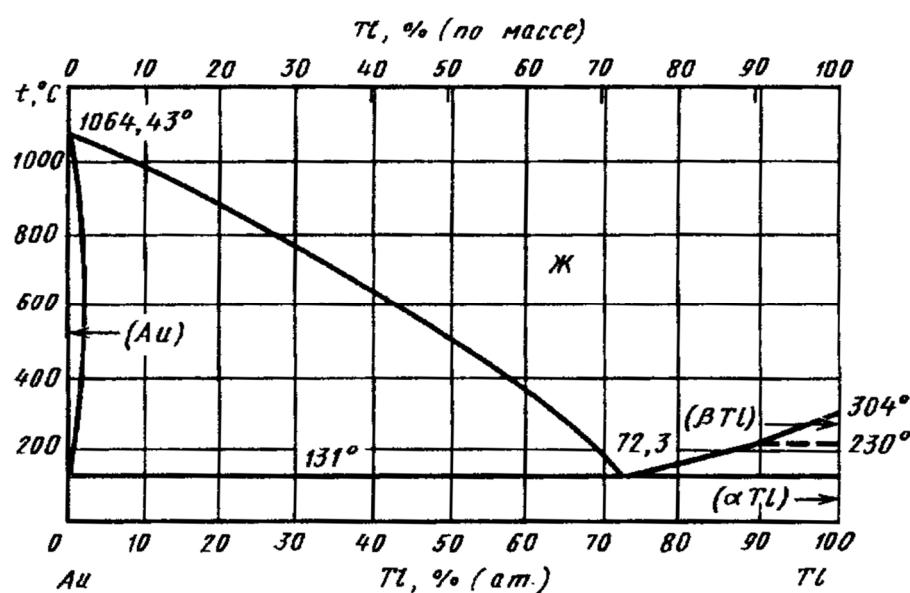


Рис. 2. Диаграмма состояния Au – Tl [23]

Fig. 2. Au – Tl state diagram [23]

Было также показано [19], что таллий, а также высокое содержание свинца в алюминиевых покрытиях, вызывают преждевременное разрушение соединения алюминиевой проволоки с золотым покрытием во время отжига или другой термообработке, ускоряя образование трещин или пустот Киркендалла в области под соединением. Было замечено, что такие откazy возникают при концентрациях Tl всего лишь 14 ppm в золотом покрытии [11]. D.W. Endicott [24] изучал влияние на прочность соединения Tl, Pb и As при концентрациях, обычно используемых в качестве добавок в электролитах для золочения, и сравнил их с покрытиями, полученными с помощью «чистых» электролитов без до-

бавок. Использование в электролитах Tl и Pb приводило к значительному снижению прочности соединения как непосредственно после сварки, так и после термического испытания при температурах 150 °C в течение 24 ч (рис. 3). Однако при низких концентрациях растворов и низкой плотности тока добавление мышьяка приводило к улучшению прочности соединения. Рис. 4 представляет собой упрощенную комбинацию нескольких рисунков, демонстрирующих эти эффекты. Этот рисунок был представлен, потому что на нем четко прослеживаются отдельные эффекты от влияния всех трех рассматриваемых компонентов.

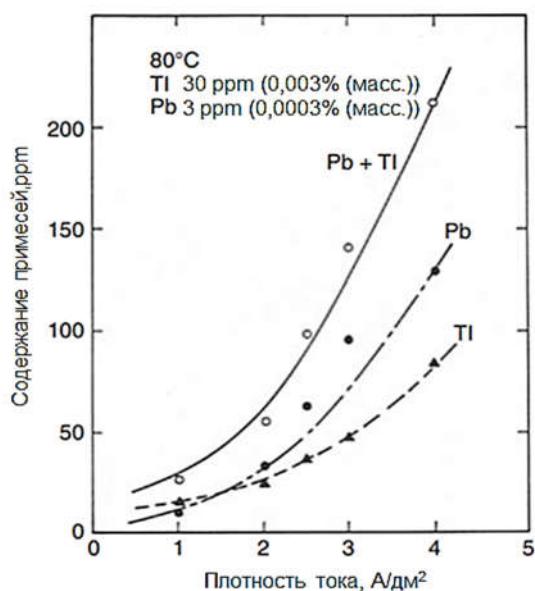


Рис. 3. Содержание Tl и Pb в золотых покрытиях в зависимости от плотности тока. Начальная концентрация в ванне составляла 3 ppm для Pb и 30 ppm для Tl [12]

Fig. 3. Tl and Pb content in gold coatings depending on the current density. The initial concentration in the bath was 3 ppm for Pb and 30 ppm for Tl [12]

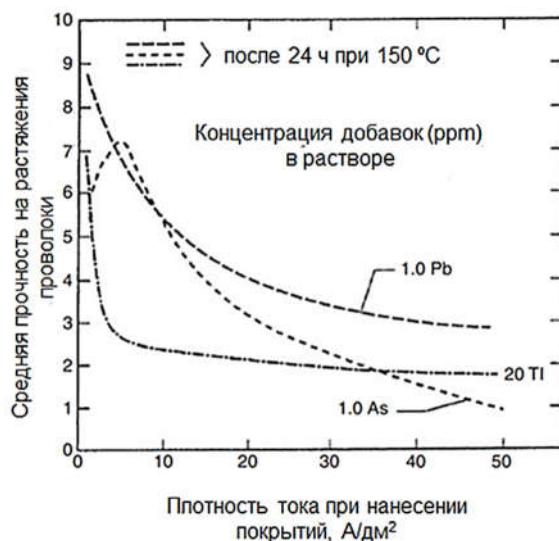


Рис. 4. Средняя прочность на растяжение соединения для проволоки Ø 32 мкм из сплава Al + 1 % Si с золотым покрытием толщиной 1,25 мкм. Концентрации добавок (Tl, Pb, As) находятся на уровне рекомендуемых частей на миллион для обеспечения оптимального размера зерна [12]

Fig. 4. Average tensile strength of Ø 32 microns wire joint made of Al + 1 % Si alloy with a gold coating of 1.25 microns thickness. The concentrations of additives (Tl, Pb, As) are at the recommended ppm level to ensure optimal grain size [12]

Ранее было отмечено, что таллий, наряду со свинцом и мышьяком, целенаправленно используют в качестве добавок в гальванические ванны для ускорения процесса осаждения золота. В качестве примера использования свинца в виде $\text{Pb}(\text{OH})_2$ и/или $\text{Pb}(\text{OH})_3$ для получения покрытия из

«мягкого золота», можно привести пример американского патента [25], а использование мышьяка в качестве добавки запатентовано в [26].

Также существует комбинированный эффект, возникающий между другими примесными элементами в покрытии и во-

дородом, такое неблагоприятное сочетание сопутствующих гальваническому процессу примесных элементов в золоте может привести к деградации соединения Al – Au. Возникновение пузырьков водорода в золотом покрытии зависит от тока осаждения и уровня загрязнения гальванической ванны [27].

Наименьшая способность к адгезии при соединении с золотыми покрытиями наблюдалась при токах нанесения покрытия от 1,6 до 2,7 А/дм², эта область соответствует началу быстрого выделения водорода на катоде и формированию дендритоподобной морфологии поверхности [28]. Некоторые условия нанесения покрытия могут привести к увеличению содержания водорода в золоте, к ним, в частности, относятся: высокая плотность тока, слабое перемешивание и низкая концентрация золота в ванне. В целом, при любых из обозначенных условий, снижающих эффективность нанесения покрытия, на катоде образуется больше молекулярного водорода, что способствует увеличению концентрации газа в золотом покрытии [29].

Условия нанесения покрытия, которые способствуют увеличению поглоще-

ния из электролита H₂ (высокая плотность тока нанесения покрытия, низкое перемешивание ванны и т.д.), являются так же причинами проблем с дефектами кристаллического строения покрытия. Кроме того, авторы работы [30] обнаружили, что чем тоньше слой Au, тем меньше вероятность дрейфа электрического сопротивления и последующего разрушения, обусловленного образованием интерметаллических фаз типа Au_xAl_y. Предварительная термическая обработка, использующая нагрев при температуре 160 °C в течение 48 ч (перед приваркой), устраняет проблему дрейфа предположительно за счет перекристаллизации золота с аморфной структурой. Однако необходимо понимать, что любая дополнительная термическая обработка способствует ускорению диффузионных процессов в покрытии.

Эти два фактора (температура и примеси), оказывающие влияние на качество покрытия, взаимосвязаны и могут осуществлять негативное воздействие как вместе, так и по отдельности, что затрудняет диагностику причин деградации сварных соединений.

Примеси, диффундирующие в покрытие из подложки

Металлы, которые являются подложкой для золотого покрытия (например, металлические «буферные» слои или адгезионные слои, такие как Ni, Ti, Cr и т.д.), или примеси, содержащиеся в золотом покрытии, могут быстро перемещаться к поверхности за счет диффузии по границам зерен. После таллия, который был подробно рассмотрен ранее, никель (в виде оксида) является наиболее часто упоминаемым металлом, снижающим прочность связи на поверхности золотых покрытий [12, 31 – 34]. Обычно считается, что он влияет на адгезию соединения (повышая энергию активации), но в [1] также упоминается, что он влияет на надежность соединений. Никель может попасть в ванну для электролитического нанесения покрытий случайно, например, в результате попадания в гальваническую ванну и медленного растворения корпуса из ковара.

Другой механизм попадания Ni в пленку Au путем термической диффузии сквозь золотую пленку из подложки. В работе [34] изучали низкотемпературную

диффузию из подложки никеля через покрытие золота различной толщины с использованием метода электрического контактного сопротивления (ЭКС). Коэффициент диффузии Ni в Au определяли методом поверхностного накопления (кинетика типа С) для толщин пленок Au 280 и 994 нм при температуре отжига 150 °C в течение 32 суток. Рентгеновскую фотоэлектронную спектроскопию использовали для определения скорости поверхностной концентрации Ni. Среднее произведение ширины границ зерен и коэффициента диффузии Ni в поликристаллическом Au было определено $\delta_b D_b = 2,0 \times 10^{-22}$ см³/с с использованием модели Хванга-Баллуффи и $\delta_b D_b = 2,5 \times 10^{-22}$ см³/с с использованием модели Ма-Баллуффи. Измерения ЭКС проводились параллельно с измерениями поверхностной концентрации, что выявило корреляцию между ЭКС и поверхностной концентрацией Ni-O. Значения ЭКС для обеих толщин пленки увеличились на 1–2 порядка при насыщении покрытия. Попе-

речные сечения пленки были извлечены с помощью фрезерования сфокусированным ионным лучом и проанализированы с помощью сканирующей просвечивающей электронной микроскопии в сочетании с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией после 32 дней отжига, что позволило напрямую наблюдать состав и толщину накопленного слоя Ni-O, который имел толщину около 3 нм. На рис. 5 представлены результаты исследований.

Японские исследователи моделировали процесс диффузии Ni через золотое покрытие (рис. 6) [31]. Для случая с электролитической подложкой никеля, которая обладает относительно крупным зерном, последующее золотое покрытие, нанесенное на него гальваническим способом, также наследует крупное зерно, в таком сочетании последующая приварка алюми-

ниевой проволоки не приводила к интенсивному развитию диффузионных процессов по границам зерен золота, и соединение обладало достаточно высокой прочностью (рис. 6a). При этом крупные зерна золотого покрытия приводили к тому, что границ зерен (как потенциальных дефектов кристаллического строения, представляющих собой пути ускоренной диффузии) было мало, что подавляло зернограницную диффузию Ni, и количество примесей Ni, представленных его оксидами (NiO), на поверхности Au было небольшим. В ходе исследований также было обнаружено, что если кристаллические зерна Au имели крупные размеры, то прочность связи проволоки не уменьшилась, даже если на поверхности Au присутствовало небольшое количество Ni.

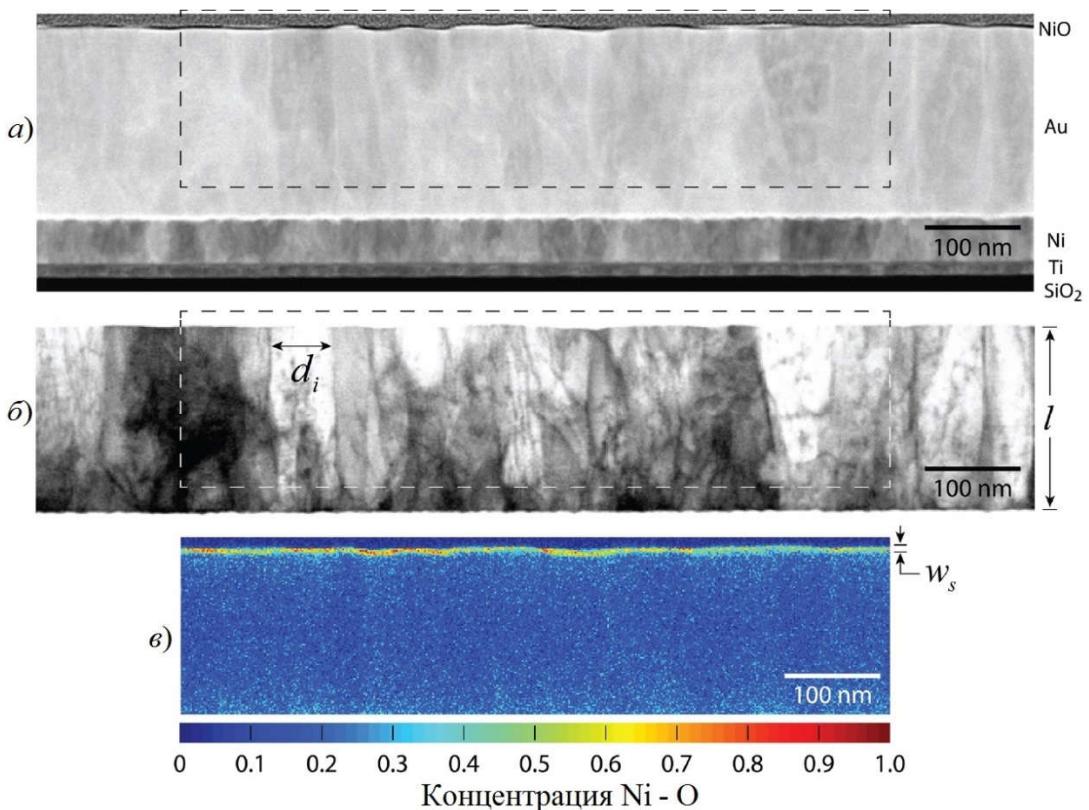


Рис. 5. Кольцевая темная микрофотография (a) и светопольная ТМ-микрофотография (б), показывающая репрезентативный вид поперечного сечения микроструктуры золотого покрытия. Область, заключенная в прямоугольник, соответствует рисунку (в), на котором представлена карта химического состава, полученная при использовании метода STEM-EDX для определения приповерхностной концентрации Ni и O. Разрешение изображения составляет 1,5 нм (размер пикселя), а толщина пленки Ni – O варьируется в зависимости от местоположения в диапазоне 1,5 – 4,5 нм при среднем значении ≈ 3 нм [34]

Fig. 5. Annular dark microphotography (a) and bright-field TEM-microphotography (b), showing a representative view of the cross-section of the gold coating microstructure. The area enclosed in a rectangle corresponds to Fig. (c), which shows a map of the chemical composition obtained using STEM-EDX method to determine the near-surface concentrations of Ni and O. The image resolution is 1.5 nm (pixel size), and the thickness of Ni – O film varies depending on the location in the range of 1.5 - 4.5 nm with an average value of ≈ 3 nm [34]

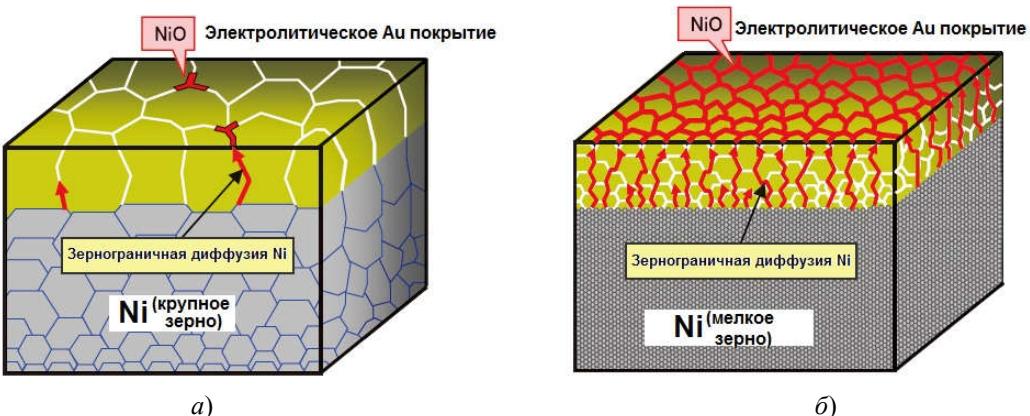


Рис. 6. Модели зерногранничной диффузии Ni через золотое покрытие: *а* – с начальным крупным зерном никелевой подложки; *б* – с относительно мелкозернистым строением никелевой подложки [31]

Fig. 6. Models of Ni grain-boundary diffusion through the gold coating: *a* – with an initial large grain of a nickel substrate; *b* - with a relatively fine-grained structure of a nickel substrate [31]

Как следствие на подложке из мелкозернистого никеля происходит образование мелкозернистого золотого покрытия (рис. 6б). При таком сочетании двух слоев металлов создается большое количество путей для диффузии никеля от подложки на поверхность золотого покрытия с последующим образование NiO. Такие покрытия имели низкую прочность соединения с алюминиевой проволокой. Закономерность очевидна, чем более мелкозернистая структура золотого покрытия, тем больше границ зерен, которые являются путями ускоренной диффузии. По этой причине наблюдалась интенсивная диффузия Ni по границам зерен, а количество примесей NiO на поверхности Au было очень большим (рис. 7).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в золотом покрытии, имеющем относительно мелкое зерно, интенсивно развиваются диффузионные процессы, использующие границы зерен в качестве путей ускоренной диффузии. В таких мелкозернистых покрытиях диффузия элементов, входящих в состав подложки, протекая даже при относительно низких температурах, будет способствовать выходу их на поверхность с последующим окислением, что будет оказывать существенное влияние на процесс микросварки.

Кроме никеля, по результатам анализа различных результатов исследований, такие элементы как Cu, Cr, Ti и Sn оказывают негативное влияние на соединения

системы Al – Au и приводят к их деградации.

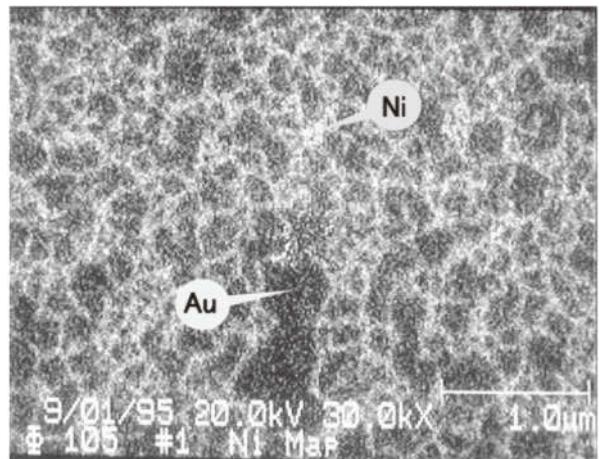


Рис. 7. Распределение Ni на поверхности золотого покрытия при исследовании методом AES анализа ENIGEG: размер изучаемой области 5 μm / 0,5 μm , режим отжига: 150 °C, 50 час [31]

Fig. 7. Ni distribution on the surface of the gold coating in the study by AES analysis method of ENIGEG: the studied area size is 5 μm / 0.5 μm , annealing mode: 150°C, 50 hours [31]

Медь может пройти тот же путь диффузии к поверхности, что и Ni. В последующем на поверхности золотого покрытия она будет окисляться и также снижать свариваемость с алюминиевыми проволоками [35-37]. Различные авторы расходятся во мнении, какая из примесей, Cu или Ni, оказывает наибольшее влияние на деградацию соединения Al – Au, и эти разногласия могут быть связаны с различиями

в используемых методах анализа для определения поверхностной концентрации, определении скорости диффузии примесей, их начальной концентрации в покрытии и т.д. Если измерять концентрацию в атомных процентах на поверхности Au, то Ni в большей степени снижает адгезию при соединении [38]. Как Cu, так и Ni следует избегать в покрытии, так как они легко окисляются, а оксиды, располагаясь на поверхности, ухудшают свариваемость. Cu и Ni по-прежнему используются в качестве компонентов при производстве корпусов ППИ или в качестве оснований/подложек ИМ и часто соединяются непосредственно с Al-проводолокой.

Хром, который часто используется для усиления адгезии между подложками и пленками Au, нанесенными в вакууме, может быстро диффундировать через

границы зерен на поверхность и окисляться также как Ni и Cu [39]. Для удаления оксида хрома с поверхностей Au и полного восстановления свариваемости было разработано специальное чистящее средство – цериево-аммиачная селитра.

Титан, как и Cr, используется в различных системах металлизации подложек [40] и может диффундировать к поверхности Au или осаждаться на ней в течение некоторой части процесса обработки [41]. На поверхности он окисляется и снижает способность к соединению. Травление золотой поверхности разбавленной HF:HNO₃ в соотношении 10:1 восстанавливает способность к образованию качественных соединений. Важное примечание, очистка должна быть тщательной, поскольку любые оставшиеся следы травления могут снизить надежность соединения.

Примеси, представленные загрязнениями

Большинство металлических загрязнений, влияющих на качество сварного соединения, проявляются в виде тонких поверхностных пленок толщиной от 20 до 200 Å. Если они состоят из неблагородных металлов, они, как правило, окисляются под воздействием термических или химических обработок поверхностей и проволок перед свариванием, и содержание оксида металла может снизить способность к привариванию за счет

на границе раздела Al – Au

ослабления адгезионного взаимодействия и, как следствие, снизить надежность соединения. Твердые хрупкие оксиды, которые встречаются на мягких металлах (например, Al₂O₃ на алюминиевой проволоке), разрушаются и выталкиваются в «зоны обломков» во время ультразвуковой сварки, поскольку Al хорошо деформируется, и, как правило, оказывают незначительное влияние на процесс сварки [42].

Примеси, продиффундировавшие в покрытие

Если бром входит в состав полимерной смеси, в которой он используется в качестве огнезащитной добавки, то пластик не загорается (даже если устройство сильно перегревается). Было проведено исследование бромных огнестойких полимерных компаундов для пластиковой инкапсуляции ППИ и ИМ. В пластиковых корпусах быстрое разрушение контакта Al – Au происходит в присутствии бромированных смол и при повышенной температуре [20].

Когда устройство нагревается во время работы, бром из пластика испаряется и проникает в систему контакта Al – Au. Бром ускоряет образование интерме-

таллических фаз типа Au_xAl_y и пустот Киркендалла, что приводит к деградации соединений. В отсутствии атомов брома скорость образования интерметаллидов на границе раздела Al – Au происходит медленно. Фактически наблюдается следующая зависимость, чем выше содержание брома в полимерной смеси, тем быстрее протекает деградация соединения Al – Au.

В заключение о примесях, входящих в состав золотого покрытия, можно привести рекомендации S. Wakabayashi с соавторами [43], который для предотвращения проблем с соединениями в системе Au – Al советовал не превышать

суммарное содержание всех примесей в золотом покрытии более 50 ppm. В настоящее время данная рекомендация

широко применяется современными зарубежными производителями ППИ и ИМ [12, 16].

Выводы

1. Еще с первых исследований С. Horsting, проведенных в 70-х годах прошлого столетия, известно, что примеси оказывают существенное влияние на образование интерметаллических соединений в системе Al – Au, способствуя проявлению дефекта «пурпурной чумы» в микросварном соединении, являющейся распространенной причиной отказов ППИ и ИМ.

2. Из примесей, попадающих в золотое покрытие из добавок, применявшихся в электролитах, наиболее вредное влияние оказывают таллий и свинец. При этом таллий является наиболее часто обсуждаемой вредной примесью в литературе. Отчасти это связано с тем, что составы электролитов с добавкой химических соединений таллия очень широко распространены в гальваническом производстве покрытий золота.

3. При температурах 131 °C растворы таллия с золотом образуют легкоплавкую эвтектику. Именно образование такой низкотемпературной эвтектики в системе Au – Tl, является ключевой причиной деградации соединений в системе Al – Au.

4. Показано, что кроме примесных элементов из электролитов, в золотом покрытии может повышаться концентрация водорода, которая способствует образованию дефектов кристаллического строения, ускоряющих диффузию и усиливающих склонность к деградации соединений.

5. Представлен механизм диффузии металлических элементов (Ni, Cu, Ti, Sn) из подложки через золотое покрытие на поверхность, с последующим образованием оксидов металлов, которые отрицательно влияют на соединение Al – Au. Наиболее часто упоминается в литературе диффузия Ni с последующим образованием на поверхности NiO, и его влияние на образование интерметаллических фаз в системе Al – Au. Доказано влияние на данный процесс размера зерна золотого покрытия, чем меньше размер зерна, тем интенсивнее протекает диффузия Ni и прочих примесей и тем больше риск отказов в соединениях.

6. Еще одна из причин способствующих деградации соединений Al – Au, это всевозможные загрязнения, которые могут присутствовать на границе биметаллического контакта. Наиболее распространенной примесью, относящейся к данной категории, является Al₂O₃.

7. Представлена еще одна причина загрязнения примесными атомами брома, который, выделяясь при нагревании из полимерных материалов, используемых в конструкции ППИ и ИМ, приводит к резкому росту электрического сопротивления в соединении Al – Au.

8. По рекомендациям S. Wakabayashi с соавторами для избегания проблем с соединениями в системе Al – Au суммарное содержание всех примесей в золотом покрытии не должно превышать 50 ppm.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Горлов, М.И. Геронтология кремниевых интегральных микросхем / М.И. Горлов, В.А. Емельянов, А.В. Строгонов, Отв. ред. Б.И. Казуров. М.: Наука, 2004. 240 с.
- Сборка 3D-изделий с использованием проволочных выводов / В.В. Зенин, А.А. Стоянов, С.В. Петров, С.Ю. Чистяков // Микроэлектроника. 2014. Т. 43, № 1. С. 29-42.
- Ефимов, И.Е. Микроэлектроника. Физические и технологические основы, надежность / И.Е. Ефимов, И.Я. Козырь, Ю.И. Горбунов. М.: Высш. шк., 1986. 464 с.
- Чернышев, А.А. Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / А.А. Чернышев. М.: Радио и связь, 1988. 256 с.
- Ahmad, S.S. Au/Al Wire Bond Interface Resistance Degradation Rate Simulations / Syed Sajid Ahmad, Scott C. Smith // IEEE Transactions on Device and Materials Reliability. 2019. Vol. 19, №. 4, December. pp. 774-781.
- Физическое металловедение: В 3-х т. / Под ред. Кана Р.У., Хаазена П. / Т. 2: Фазовые превращения в металлах и сплавах и сплавы с особыми

- физическими свойствами: Пер. с англ. М.: Металлургия, 1987. 624 с.
7. Хмыль, А.А. Гальванические покрытия в изделиях электроники / А.А. Хмыль, В.Л. Ланин, В.А. Емельянов. Минск: Интегралполиграф, 2017. –453 с.
 8. Горлов, М.И. Физические основы надежности интегральных схем / М.И. Горлов, Н.С. Данилин. М.: МАКС Пресс, 2008. 404 с.
 9. Исследование прочности и долговечности проволочных микросварных соединений алюминий-золото при изготовлении микромеханических датчиков / А.В. Старцева, А.С. Ковалев, В.Ю. Бобов, Д.Р. Гаглоев // Материалы XVI конференции молодых ученых «Навигация и управление движением», 2014. С. 395-400.
 10. Зернограничная диффузия и свойства наноструктурных материалов / Ю.Р. Колобов, Р.З. Валиев, Г.П. Грабовецкая и др. Новосибирск: Наука, 2001. 232 с.
 11. Horsting, C., Purple Plague and Gold Purity / C. Horsting; 10th Annual Proc. IRPS, Las Vegas, Nevada, April 5–7, 1972. pp. 155-158.
 12. Harman, George G. Wire Bonding in Microelectronics / George G. Harman; Third Edition. McGraw Hill Professional, 2010. 426 p.
 13. Зенин, В.В. Конструктивно-технологические аспекты сборки полупроводниковых изделий: Учеб. пособие. / В.В. Зенин, А.В. Рягузов. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т. 2005. 353 с.
 14. Гальванические покрытия в машиностроении. Справочник. В 2-х томах / Под ред. М. Л. Шлутера. – М.: Машиностроение, 1985. Т. 1. 1985. 240 с.
 15. Гамбург, Ю.Д. Гальванические покрытия. Справочник по применению / Ю.Д. Гамбург. М.: Техносфера, 2006. 216 с.
 16. Materials for Advanced Packaging / Editors: Daniel Lu, C.P. Wong. Springer, 2017. 969 p.
 17. Evans, K.L. Investigation of the Effect of Thallium on Gold/Aluminum Wire Bond Reliability / K.L. Evans, T.T. Guthrie and R.G. Hays // Proc. ISTFA, Los Angeles, California, 1984. pp. 1-10.
 18. Okumara, K. Degradation of Bonding Strength (Al Wire-Au Film) by Kirkendall Voids / K. Okumara // Electrochem. Soc. 1981. Vol. 128. pp. 571-575.
 19. James, H. K. Resolution of the Gold Wire Grain Growth Failure Mechanism in Plastic Encapsulated Microelectronic Devices / H. K. James / IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, Vol. CHMT-3, № 3, September, 1980. pp. 370-374.
 20. Advanced Wirebond Interconnection Technology / K. Prasad Shankara. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2004. 668 p.
 21. Thermal Stress and Strain in Microelectronics Packaging / Edited by John H. Lau. New York: Van Nostrand Reinhold, 2012. 884 p.
 22. Коренман, И.М. Аналитическая химия таллия / И.М. Коренман. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1960. 172 с.
 23. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3 т.: Т. 1 / Под общ. ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1996. 992 с.
 24. Endicott, D.W. Effects of Gold-Plating Additives on Semiconductor Wire Bonding / D.W. Endicott, H.K. James and F. Nobel // Plating and Surface Finishing. 1981. Vol. 68, №11. pp. 58-61.
 25. United States Patent US3833487A C25D3/48 Electrolytic soft gold plating : 1972-12-22 Application filed by Bell Telephone Laboratories Inc; 1972-12-22 Priority to US00317600A; 1974-09-03 Application granted; 1974-09-03 Publication of US3833487A; 1991-09-03 Anticipated expiration; Status Expired – Lifetime.
 26. United States Patent US3423295A C25D3/48 Gold plating : 1966-02-23 Application filed by Engelhard Industries Inc; 1969-01-21 Application granted; 1969-01-21 Publication of US3423295A; 1981-12-14 Assigned to Engelhard Corporation; 1986-01-21 Anticipated expiration; Status Expired – Lifetime.
 27. Dimitrijević, S. Non-Cyanide Electrolytes for Gold Plating – A Review / Silvana Dimitrijević, M. Rajčić-Vujasinović, V. Trujić // International Journal of Electrochemical Science. 2013. № 8. pp. 6620-6646.
 28. Modern Electroplating / Edited by Mordechay Schlesinger and Milan Paunovic. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2010. 729 p.
 29. Вячеславов, П.М. Гальванотехника благородных и редких металлов / П.М. Вячеславов, С.Я. Грилемес, Г.К. Буркат, Е.Г. Круглова. М.: Машиностроение, 1970. 248 с.
 30. Murcko, R.M. Resistance Drift in Aluminum to Gold Ultrasonic Wire Bonds / Robert M. Murcko, Robin A. Susko, and John M. Lauffer // IEEE Transactions on components, hybrids, and manufacturing technology. 1991. Vol. 14, №. 4. pp. 843-847.
 31. Electroless Ni/Pd/Au plating for semiconductor package substrates – effect of gold plating combinations on gold wire bonding reliability / Yoshinori Ejiri, Takehisa Sakurai, Yoshinori Arayama, Yoshiaki Tsubomatsu, Shuuichi Hatakeyama // Electronics Packaging Society Journal. 2014. Vol. 17, № 4. pp. 297-306.
 32. Микросварные соединения золотой проволоки с Cu-Ni металлизацией кристаллов полупроводниковых изделий / А.И. Землянский, А.Е. Бороментов, С.В. Родивилов, Д.И. Бокарев, В.В. Зенин // Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика. – 2018. – № 3. – С. 22 – 30.
 33. Influences of Electroless Nickel Film Conditions on Electroless Au/Pd/Ni Wire Bondability / Ikuhiro Kato, Tomohito Kato, Hajime Terashima, Hideto Watanabe, and Hideo Honma // Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging. 2010. Vol. 3, № 1. pp. 78-85.
 34. Grain boundary diffusivity of Ni in Au thin films and the associated degradation in electrical contact resistance due to surface oxide film formation / N.

- Argibay, M.T. Brumbach, M.T. Dugger and P.G. Kotula // Journal of Applied Physics. 2013. Vol. 113. № 114906.
35. Future and Technical Considerations of Gold Wire-bonding in Semiconductor Packaging - A Technical Review / Chong Leong Gan, Francis Classe, Bak Lee Chan, Uda Hashim // Microelectronics International. 2014. Vol. 31/2. pp. 121-128.
36. Comparison and Mechanism of Electromigration Reliability Between Cu Wire and Au Wire Bonding in Molding State / Yahong Du, Li-Yin Gao, Daquan Yu, Zhi-Quan Liu // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – Published online: 06 Januarx 2020. <https://doi.org/10.1007/s10854-019-02840-6>
37. Handbook of Semiconductor Interconnection Technology / Edited by Geraldine C. Schwartz & Kris V. Srikrishnan. – Boca Raton; London; New York: Taylor & Francis Group, 2006. 520 p.
38. Dini, J.W. Influence of Codeposited Impurities on Thermocompression Bonding of Electroplated Gold / J.W. Dini and H.R. Johnson // Proc. ISHM Symposium, Los Angeles, CA, October. 1979. pp. 89-95.
39. Panousis, N.T. Bonding Degradation in the Tantalum Nitride-Chromium-Gold Metallization System / N.T. Panousis and H.R. Bonham // IEEE 11 th Annual Proceedings Reliability Physics. 1973. p. 21.
40. Corcoran Y.L. Grain Boundary Diffusion Layers on Silicon and Growth of Titanium Silicide / Yunji L. Corcoran, Alexander H. King // Journal of Electronic Materials. 1990. Vol. 19, № 11. pp. 89-95.
41. Thompson, R.J. Bondability Problems Associated with the Ti-Pt-Au Metallization of Hybrid Micro-wave Thin Film Circuits / Robert J. Thompson, Donald R. Cropper, and Bradley W. Whitaker // IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology. – 1981. – Vol. CHMT-4, № 4. – pp. 439 – 445.
42. Сидняев, Н. И. Обзор исследований физики отказов для оценки показателей надежности радиоэлектронных приборов современных РЛС / Н.И. Сидняев // Физические основы приборостроения. 2017. Т. 6. № 2 (24). С. 4-52.
43. Wakabayashi, S. Effects of Grain Refiners in Gold Deposits on Aluminum Wire-Bond Reliability / S. Wakabayashi, A. Murata, and N. Wakobauashi // Plating and Surface Finishing. 1982. № 8. pp. 63-68.

REFERENCES

1. Gorlov MI, Yemelyanov VA, Stroganov AV. Gerontology of silicon integrated circuits. Moscow: Nauka; 2004.
2. Zenin VV, Stoyan AA, Petrov SV, Chistyakov AV. Assembling 3D products using wire leads. Microelectronics. 2014;43(1):29-42.
3. Efimov IE, Kozyr IYa, Gorbunov YuI. Microelectronics. Physical and technological foundations, reliability. Moscow: Vysshaya Shkola; 1986.
4. Chernyshev AA. Fundamentals of reliability of semiconductor devices and integrated circuits. Moscow: Radio I Svyaz; 1988.
5. Ahmad SS, Smith SK . Au/Al Wire Bond Interface Resistance Degradation Rate Simulations. IEEE Proceedings on the Reliability of Devices and Materials. 2019;19(4):774-781.
6. Kan RU, Haazen P, editors. Physical metallurgy: phase transformations in metals and alloys and alloys with special physical properties. Moscow: Metallurgiya; 1987.
7. Khmyl AA, Lanin VL, Yemelyanov VA. Galvanic coatings in electronics products. Minsk: Integralpoligraf; 2017.
8. Gorlov MI, Danilin NS. Physical foundations of integrated circuits reliability. Moscow: MAKS Press; 2008.
9. Startseva AV, Kovalev AS, Bobov VYu, Gagloev DR. Study of strength and durability of wire micro-welded aluminum-gold compounds in the manufacture of micromechanical sensors. Proceedings of the XVI Conference of Young Scientists, 2014: Navigation and Traffic Control; 2014.
10. Kolobov YuR, Valiev RZ, Grabovetskaya GP. Grain boundary diffusion and properties of nanostructured materials. Novosibirsk: Nauka; 2001.
11. Horsting K. Purple plague and gold purity. 10th Annual Conference. IRPS, Las Vegas, Nevada, April 5-7, 1972. p. 155-158.
12. Harman GG. Connecting wires in microelectronics.3rd edition. McGraw Hill Professional; 2010.
13. Zenin VV, Ryaguzov AV. Constructive and technological aspects of assembling semiconductor products: textbook. Voronezh: Voronezh State Technical University; 2005.
14. Schluter ML, editor. Galvanic coatings in mechanical engineering: handbook. Moscow: Mashinostroenie; 1985.
15. Hamburg YuD. Galvanic coatings: handbook. Moscow: Technosphera; 2006.
16. Lu D, Wong KP, editors. Materials for advanced packaging. Springer; 2017.
17. Evans KL, Guthrie TT, Hayes RG. Investigation of the effect of thallium on gold/aluminum wire bond reliability. Los Angeles, California: Proc. ISTFA; 1984.
18. Okumara K. Degradation of bonding strength (Al Wire-Au Film) by Kirkendall voids. Electrochem. Soc. 1981;128:571-575.
19. James HK. Resolution of the gold wire grain growth failure mechanism in plastic encapsulated microelectronic devices. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, September, 1980;3(3):370-374.

20. Shankara KP. Advanced wirebond interconnection technology. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers; 2004.
21. Lau JH, editor. Thermal stress and strain in microelectronics packaging. New York: Van Nostrand Reinhold; 2012.
22. Korenman IM. Analytical chemistry of thallium. Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR; 1960.
23. Lyakishev NP, editor. Diagrams of the state of double metal systems: handbook. Moscow: Mashinostroenie; 1996.
24. Endicott DW, James HK, Nobel F. Effects of gold-plating additives on semiconductor wire bonding. *Plating and Surface Finishing*. 1981;68(11):58-61.
25. USA Patent US3833487A C25D3/48 Electrolytic soft gold plating: 1972-12-22 Application filed by Bell Telephone Laboratories Inc; 1972-12-22 Priority to US00317600A; 1974-09-03 Application granted; 1974-09-03 Publication of US3833487A; 1991-09-03 Anticipated expiration; Status Expired – Lifetime.
26. USA Patent US3423295A C25D3/48 Gold plating: 1966-02-23 Application filed by Engelhard Industries Inc; 1969-01-21 Application granted; 1969-01-21 Publication of US3423295A; 1981-12-14 Assigned to Engelhard Corporation; 1986-01-21 Anticipated expiration; Status Expired – Lifetime.
27. Dimitrievich S, Raichich-Vuyasinovich M, Truich V. Non-cyanide electrolytes for applying gold coating: review. *Internat Journ of Electrochemical Sciences*. 2013;8:6620-6646.
28. Schlesinger M, Paunovic M. Modern electroplating. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.; 2010.
29. Vyacheslavov PM, Grilekhes SYa, Burkat GK, Kruglova EG. Electroplating of noble and rare metals. Moscow: Mashinostroenie; 1970.
30. Murcko RM, Susko RA, Lauffer JM. Resistance drift in aluminum to gold ultrasonic wire bonds. *IEEE Transactions on components, hybrids, and manufacturing technology*. 1991;14(4):843-847.
31. Ejiri Yo, Sakurai T, Arayama Yo, Tsubomatsu Yo, Hatakeyama Sh. Electroless Ni/Pd/Au plating for semiconductor package substrates – effect of gold plating combinations on gold wire bonding reliability. *Electronics Packaging Society Journal*. 2014;17(4):297-306.
32. Zemlyansky AI, Bormontov AE, Rodivilov SV, Bokarev DI, Zenin VV. Micro-welded joints of gold wire with Cu-Ni metallization of crystals of semiconductor products. *Proceedings of Voronezh State University. Physics. Mathematics*. 2018;3:22-30.
33. Kato I, Kato T, Terashima H, Watanabe H, Honma H. Influences of electroless nickel film conditions on electroless Au/Pd/Ni wire bondability. *Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging*. 2010;3(1):78-85.
34. Argibay N, Brumbach MT, Dugger MT, Kotula PG. Grain boundary diffusivity of Ni in Au thin films and the associated degradation in electrical contact resistance due to surface oxide film formation. *Journal of Applied Physics*. 2013;113(114906).
35. Gang CL, Klass F, Chan BL, Hashim U. The future and technical considerations for the use of gold wire in semiconductor packaging: technical review. *Microelectronics International*. 2014;31/2:121-128.
36. Du Ya, Gao Li-Yin, Yu D, Liu Zhi-Quan. Comparison and mechanism of electromigration reliability between Cu Wire and Au wire bonding in molding state. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics [Internet]*. 2020 January 06. Available from: doi.org/10.1007/s10854-019-02840-6
37. Schwartz GC, Srikrishnan KV, editors. Handbook of semiconductor interconnection technology. Boca Raton; London; New York: Taylor & Francis Group; 2006.
38. Dini JW, Johnson HR. Influence of codeposited impurities on thermocompression bonding of electroplated gold. *Proc. ISHM Symposium*; 1979 October; Los Angeles, CA: 1979. p. 89-95.
39. Panus NT, Bonham HR. Bonding degradation in the tantalum nitride-chromium-gold metallization system. *IEEE 11th Annual Proceedings Reliability Physics*; 1973. p. 21.
40. Corcoran YL, King AH. Grain boundary diffusion layers on silicon and growth of titanium silicide. *Journal of Electronic Materials*. 1990;19(11):89-95.
41. Thompson RJ, Cropper DR, Whitaker BW. Bondability problems associated with the Ti-Pt-Au metallization of hybrid microwave thin film circuits. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*. 1981;CHMT-4(4):439 – 445.
42. Sidnyaev NI. Review of studies on the physics of failures for reliability assessment of electronic devices of modern radars. *Physical Bases of Instrumentation*. 2017;6(2(24)):4-52.
43. Wakabayashi S, Murata A, Wakobauashi N. Effects of grain refiners in gold deposits on aluminum wire-bond reliability. *Plating and Surface Finishing*. 1982;8:63-68.

Информация об авторах:

Макаренко Константин Васильевич – доктор технических наук, доцент, временно исполняющий обязанности заведующего кафедрой «Машиностроение и материаловедение» Брянского государственного технического университета; тел.: +7(4832) 58-82-18.

Котлярова Ирина Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение» Брянского государственного технического университета; тел.: +7(4832) 58-82-18.

Makarenko Konstantin Vasilyevich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Acting Head of the Department of Mechanical Engineering and Material Science at Bryansk State Technical University; phone: +7(4832) 58-82-18.

Kotlyarova Irina Aleksandrovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Material Science at Bryansk State Technical University; phone: +7(4832) 58-82-18.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 21.12.2023; одобрена после рецензирования 28.12.2023; принятa к публикации 27.02.2024. Рецензент – Петрешин Д.И., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 21.12.2023; approved after review on 28.12.2023; accepted for publication on 27.02.2024. The reviewer is Petreshin D.I., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.