

Электромиграция

в электронных узлах силовой электроники

Проблема электромиграции в паяных контактах элементов силовой электроники до сих пор рассматривалась недостаточно. Хотя плотность тока в этих паяных соединениях и не достигает такой величины, как, например, в контактах Flip-Chip, электромиграция может быть инициирована повышенной температурой. Экспериментально была исследована деградация SnPb и SnAgCu паяных контактов компонентов формы ТО, которая была вызвана высокой температурой и электрическим током до 60 А. Дифференцированная оценка электрических и термических эффектов проводилась с помощью методов металлографии. В данной статье представлены конструкционные особенности эксперимента, методика измерений и результаты проведенных исследований.

Карстен Майер

meier@avt.et.tu-dresden.de

**Майк Реллиг
Штеффен Визе
Клаус-Юрген Волтер
Карстен Гете
Ульрих Демль**

Перевод: Андрей Новиков

andrej.novikov@uni-rostock.de

Введение

В силовой электронике есть много факторов, которые оказывают влияние на надежность электронного узла. По сравнению с хорошо изученными термическими и механическими нагрузками проблема электромиграции в паяных контактах компонентов силовой электроники является на данный момент недостаточно изученной. Необходимая для проявления электромиграции высокая плотность тока присутствует, как правило, только в очень маленьких паяных контактах, как, например, в контактах Flip-Chip компонента. Правда, не исключена возможность активации электромиграции за счет высокотемпературной нагрузки при менее высокой плотности тока, чем в контактах Flip-Chip. В связи с этим необходимо провести исследование и оценку возможного действия электрической нагрузки и в паяных контактах с большим объемом.

В данной работе публикуются результаты практических исследований термически и электрически инициированной деградации паяных контактов с большим объемом. В качестве объектов исследований были выбраны компоненты силовой электроники формы ТО. Были проанализированы эффекты, возникающие при термической и электрической нагрузке в свинецсодержащих (SnPb) и бессвинцовых (SnAgCu) паяных соединениях. Для исследования эффектов электромиграции была сконструирована и изготовлена установка, позволяющая пропускать ток до 60 А через испытываемые пробы с целью достижения необходимой плотности тока. Данная установка подробно описывается в статье.

Также будут рассмотрены проблемы и их решения, возникающие при нагрузке ТО-компонентов такими высокими токами. Тепловизионная система была использована для точной установки температуры исследования паяных контактов.

Миграция отдельных элементов металлизации контактов и вызванный тем самым рост интерме-

таллических фаз проанализированы с помощью металлографического метода. В отличие от эффекта Киркендалля (Kirkendall voiding — поры Киркендалля, эффект, вызванный противоположно направленными, различными по интенсивности потоками частиц, приводящими к образованию пор), который проявляется во Flip-Chip контактах, в паяных контактах с большим объемом деградация происходит преимущественно за счет роста интерметаллических фаз.

Процессы электромиграции будут более подробно рассмотрены в данной работе и сравнены с процессами, инициированными высокотемпературной нагрузкой. Установлена зависимость между наблюдаемыми эффектами и их термической или электрической причиной. Также проведено сравнение результатов исследования относительно применяемого припоя.

Электромиграция в полупроводниковых компонентах, компонентах поверхностного монтажа и силовой электроники

Микроэлектроника — первая область промышленности, которая столкнулась с проблемой электромиграции. Проводники, реализованные в полупроводниковом элементе, имеют настолько маленькое сечение, что даже при небольших электрических токах и без учета эффекта неравномерного распределения тока (так называемого current crowding) достигается высокая плотность тока [1, 2]. За счет контакта с кремнием, который обладает хорошими свойствами теплопроводности, уменьшается возможность повреждения проводников из-за саморазогрева. В отличие от паяного соединения проводник представляет собой цельную систему. Эффекты электромиграции и лежащие в их основе закономерности в подобной системе были уже ранее исследованы в многочисленных работах [3, 4]. В них перенос электронов был определен как главная движущая сила

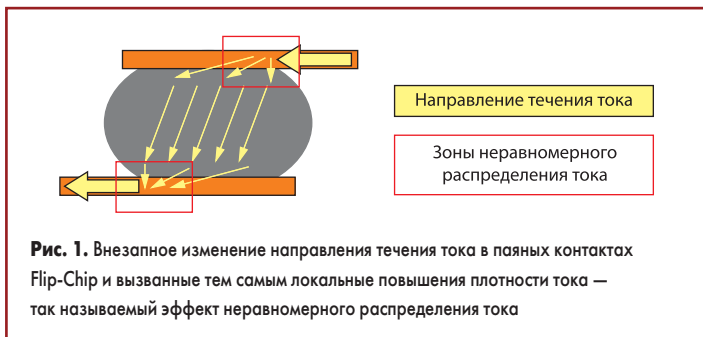


Рис. 1. Внезапное изменение направления течения тока в паяных контактах Flip-Chip и вызванные тем самым локальные повышения плотности тока — так называемый эффект неравномерного распределения тока

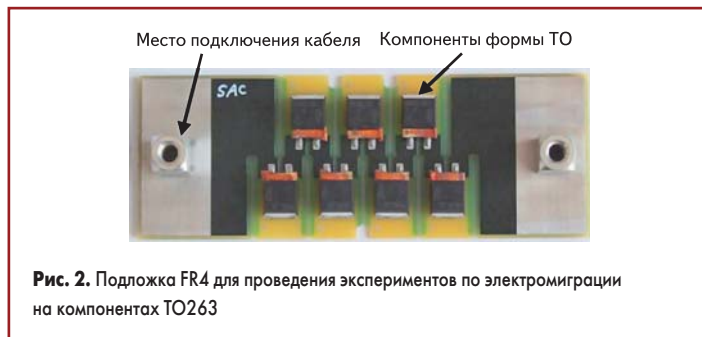


Рис. 2. Подложка FR4 для проведения экспериментов по электромиграции на компонентах TO263

электромиграционных процессов. Закономерный вывод — эффекты электромиграции зависят от направления и плотности переноса электронов. Было установлено, что на возникновение данного эффекта также оказывают влияние температурная и механическая нагрузки. Поры Киркендала и механические напряжения являются главными причинами отказа проводников полупроводниковых компонентов.

В связи с постоянной миниатюризацией электронных компонентов и узлов происходит также уменьшение токонесущих площадей сечений паяных контактов этих узлов. Большое сокращение площади сечений происходит, например, в компонентах типа FBGA, CSP или Flip-Chip. Тем самым электромиграция оказывает влияние на надежность данных компонентов. Наряду с сокращением токонесущей площади сечения эффект неравномерного распределения тока значительно усиливает процессы электромиграции на переходе проводника в контактную площадку (рис. 1) [5]. Из-за резкого изменения направления течения тока в этом месте происходит локальное увеличение плотности тока. В отличие от проводника в полупроводниковом компоненте в паяном соединении ток протекает через большое количество материалов различных слоев, металлизаций, сплавов и интерметаллических фаз. Таким образом, рост интерметаллических фаз наряду с эффектом пор Киркендала оказывает негативное влияние на надежность паяных соединений с небольшим объемом.

С учетом геометрических условий в паяном контакте с большим объемом могут быть значительно меньшие плотности тока. Для достижения большой плотности тока через эти контакты должен протекать ток с большим значением. Компоненты, применяемые в автомобильной и силовой электронике, испытывают наибольшую нагрузку [6]. Несмотря на это, плотность тока в паяных контактах данных компонентов не достигает значений, которые типичны для контактов Flip-Chip или даже для проводников на полупроводниковых элементах. При высокой температуре эксплуатации допускаются электромиграционные процессы или их усиление, а также процессы температурной миграции в данных компонентах. Саморазогрев компонентов за счет высокой мощности потерь и их близкое расположение к источникам тепла (например, двигатель внутреннего сгорания или коробка передач) могут привести к повышению температуры. В паяных контактах с большим объемом это ведет в основном к росту интерме-

таллических фаз, как фактору, снижающему надежность. Механические свойства интерметаллических фаз отличаются от материала припоя и являются критическими при рассмотрении надежности паяного соединения.

При обобщении всех этих факторов очевидна необходимость исследования эффектов, индуцированных электрическим током в паяных соединениях большого объема. Особенности интерес эти исследования представляют для области силовой и автомобильной электроники.

Геометрия проб и испытательный стенд

Пробы для исследования электромиграционных эффектов

Для исследования электромиграционных эффектов на компонентах формы TO263 была спроектирована подложка из материала FR4, которая позволяет нагружать высоким током одновременно несколько компонентов (рис. 2). Проба конструировалась также с учетом простого манипулирования ею и ее разделения для дальнейших металлографических исследований. Для предотвращения во время эксперимента деградации самой подложки были реализованы особенно широкие и толстые медные проводники для снижения в них плотности тока. На каждую подложку были смонтированы семь подключенных в ряд компонентов TO. Один контакт элемента подсоединен к отрицательному, а другой — к положительному полюсу источника питания для исследования обоих направлений тока на каждом компоненте. Контакты состояли из комбинаций материалов: медь/олово для свинецсодержащего припоя SnPb и медь/никель/олово для бессвинцового припоя SnAgCu.

В паяных контактах, которые соединены со стороны подложки с отрицательным по-

люсом источника питания, ток течет от компонента TO через паяное соединение к подложке. В действительности же электрический ток имеет противоположное направление (рис. 3б). В паяных контактах, которые соединены со стороны подложки с положительным полюсом источника питания, ток и электроны направлены соответственно противоположно. Чтобы исключить активное участие полупроводникового элемента в эксперименте, его контакты были закорочены медной перемычкой.

Для проведения всех экспериментов были параллельно смонтированы электронные узлы с двумя припоями. SnAgCu (SAC) был выбран в качестве широко распространенного бессвинцового припоя для изучения влияния эффектов электромиграции на рост интерметаллических фаз. Для изучения этого эффекта на свинецсодержащем припое были смонтированы электронные узлы с припоем SnPb. Все электронные узлы и их части были смонтированы и изготовлены согласно промышленным условиям, чтобы обеспечить их идентичность электронным узлам, находящимся в условиях реальной эксплуатации.

Испытательный стенд для нагрузки проб током до 60 А

Для исследования электромиграции пробы были закреплены на нагревательных плитках. Эти плитки состоят из нагреваемых слоев, верхнего и нижнего, и закреплены в корпусе из поликарбоната. Эксперименты можно проводить при контролируемой температуре и ее равномерном распределении. На одной нагревательной плитке монтировались два тестовых печатных узла, что обеспечивало эквивалентные условия их испытания. Несколько нагревательных плиток позволяют



Рис. 3. а) Компонент TO263 с медной перемычкой; б) течение электронов через контакт, подсоединенный со стороны подложки с отрицательным полюсом источника питания

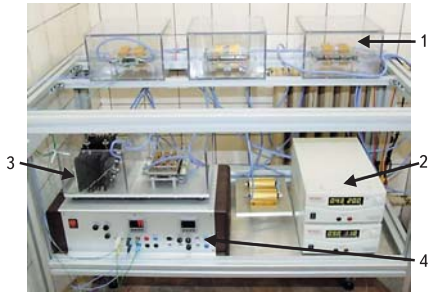


Рис. 4. Испытательный стенд для исследования электромиграции:
1 — нагревательные плитки;
2 — источники питания;
3 — твердотельные реле;
4 — управление температурой и шириной импульсов

проводить несколько экспериментов параллельно. Для электрической нагрузки электронных узлов использовались источники постоянного тока с максимальным током в 60 А и максимальным напряжением в 15 В.

Для предотвращения нежелательного саморазогрева тестируемых электронных узлов использовались твердотельные реле ($I_{\max} = 100$ А) для пульсации тока нагрузки, встроенные в испытательный стенд. Для установления желаемого отношения ширины импульсов T они управлялись сигналами с модулированной шириной импульсов:

$$T = t_{ON} / (t_{ON} + t_{OFF}). \quad (1)$$

Полная конструкция испытательного стенда, включая источники питания, нагревательные плитки и управление температурой и шириной импульсов, показана на рис. 4.

Термографический анализ для установления температуры испытания

Для контролирования температуры и ее распределения на испытываемой подложке во время нагрузки электрическим током использовалась термографическая камера. При этом изменялась ширина импульсов для определения подходящих параметров при различных температурах испытания. На рис. 5 показано распределение температуры при токе $I = I_3$ и отношении ширины импульсов $T = 1$ и $T = 0,1$.

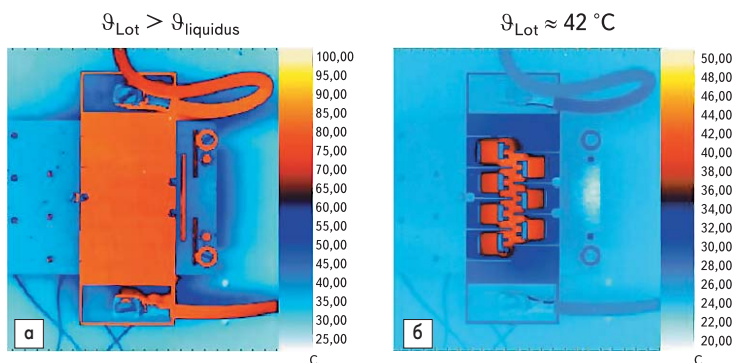


Рис. 5. Температура и ее распределение на тестируемом электронном модуле при токе $I = I_3$ и отношении ширины импульсов: а) $T = 1$; б) $T = 0,1$

При этом хорошо видно равномерное распределение температуры над паяными контактами. Расплавленный припой указывает на превышение температуры ликвидуса в отличие от зафиксированной камерой максимальной температуры при нагрузке постоянным током ($T = 1$). Это обусловлено эффектом насыщения сенсорного элемента камеры.

Термографические исследования показывают, что для проведения испытаний электронных узлов на электромиграцию при определенных температурах необходимо сокращение саморазогрева, и пульсация тока нагрузки — оптимальный метод для решения этой проблемы.

Рис. 5б показывает уменьшение температуры вследствие саморазогрева при пульсации шириной $T = 0,1$ до $T_{\text{припой}} = 42$ °С. За счет пульсации тока нагрузки время испытания увеличивается с фактором f_T при неизменной продолжительности нагрузки:

$$f_T = 1/T. \quad (2)$$

Поэтому была установлена минимальная температура испытаний $T = T_{EM1}$, чтобы при максимальном токе нагрузки $I = I_3$ (таблица) не превысить продление срока экспериментов с фактором $f_T = 5$.

Цели и условия проведенных экспериментов

Эксперименты для определения деградации, вызванной температурой

Дополнительно к экспериментам для исследования электромиграции были проведены испытания по принципу нагрузки высокой температурой. Результаты этих испытаний использовались для определения механизмов деградации, вызванных исключительно повышенной температурой, чтобы отграничить их от эффектов, вызванных электрическим током. Для испытания электронных узлов со свинецсодержащими и бессвинцовыми паяными соединениями была выбрана температура нагрузки T_{HTS} и определена продолжительность нагрузки $t_{HTS} = t_{HTS1}, t_{HTS2}$ и t_{HTS3} ($t_{HTS1} < t_{HTS2} < t_{HTS3}$). Оценка испытаний проводилась с помощью металлографических методов.

Эксперименты для определения деградации, вызванной электрическим током

При исследовании электромиграции изменялись токи нагрузки и температура. При вариации токов нагрузки $I = I_1, I_2$ и I_3 достигались различные значения плотности тока в паяных контактах ($I_1 < I_2 < I_3$). Расчет плотности тока производился при помощи значения площади контакта TO ($0,8 \times 1,6$ мм²). В качестве ориентира для установления плотности тока служило значение $S = 10$ кА/см² [2] как критическая величина для активации электромиграционных процессов в проводниках полупроводниковых элементов.

С помощью нагревательных плиток и импульсов тока нагрузки с модуляцией ширины импульсов были установлены значения температуры испытаний $T_{EM} = T_{EM1}, T_{EM2}$ и T_{EM3} ($T_{EM1} < T_{EM2} < T_{EM3}$). Испытания при температуре T_{EM1} должны выявить процессы, вызванные исключительно нагрузкой электрическим током. Повышение температуры испытаний до значений T_{EM2} и T_{EM3} должно поддерживать процессы, вызванные электрическим током, но слабо выраженные при температуре T_{EM1} . Сравнение с результатами высокотемпературной нагрузки способствует разделению электрически и термически вызванных процессов. Независимо от приложенного тока нагрузки I и температуры испытаний T_{EM} продолжительность нагрузки током не должна превышать значения t_{EM} . Таким образом, можно вывести соответствующую продолжительность испытания t'_{EM} в зависимости от f_T .

$$t'_{EM} = t_{EM} \times f_T. \quad (3)$$

В таблице представлены условия испытаний. Для оценки результатов испытаний использовались методы металлографии.

Таблица. Условия проведения испытаний на электромиграцию: отношение ширины импульсов T

Температура	Нагрузка электрическим током, А		
	I_1	I_2	I_3
T_{EM1}	1	0,31	0,2
T_{EM2}	1	0,62	0,3
T_{EM3}	1	0,62	0,52

Результаты исследований

Рост интерметаллических фаз и укрупнение структуры вследствие высокотемпературной нагрузки

После высокотемпературной нагрузки в паяных контактах SnAgCu происходит заметное укрупнение микроструктуры. В исходном состоянии (после процесса пайки) для микроструктуры характерны многочисленные маленькие с округлой формой фазы Cu_6Sn_5 и Ag_3Sn , которые окружены более крупными дендритами олова (рис. 6а). В процессе температурной нагрузки до t_{HTS3} эти многочисленные мелкие фазы объединяются в немногочисленные более крупные фазы (рис. 6б–г). Как это следует из рис. 6 Па–г, аналогичные процессы происходят и в паяных контактах припоя SnPb.

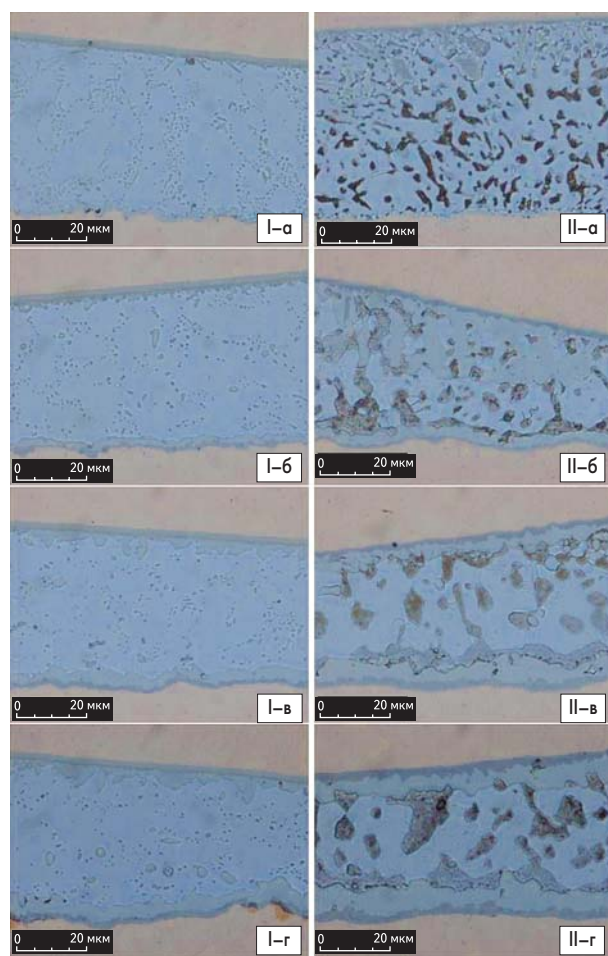


Рис. 6. Микроструктура паяных контактов SnAgCu (I) и SnPb (II): а) в исходном состоянии; б) после температурной нагрузки t_{HTS1} ; в) t_{HTS2} ; г) t_{HTS3}

В исходном состоянии эти контакты имеют микроструктуру с характерными, хорошо распределенными фазами олова и свинца. Во время температурной нагрузки до t_{HTS2} эта структура значительно укрупняется за счет расслоения. Дальнейшая нагрузка до t_{HTS3} не ведет к следующему укрупнению микроструктуры. Видимо, что до значения t_{HTS2} устанавливается состояние равновесия.

На пограничном слое между припоем и медной металлизацией подложки в обоих припоях в исходном состоянии присутствует холмообразная фаза Cu_6Sn_5 толщиной около 1–2 мкм. Между фазой Cu_6Sn_5 и медной металлизацией подложки, возможно, находится фаза Cu_3Sn , которую нельзя обнаружить оптическим методом. Во время температурной нагрузки до t_{HTS3} происходит рост фазы до толщины около 5 мкм, и фаза становится более гладкой и замкнутой. В паяных контактах из припоя SnPb фаза Cu_6Sn_5 достигает толщины в 5 мкм уже после t_{HTS2} . Между фазой Cu_6Sn_5 и медной металлизацией подложки во время температурной нагрузки происходит рост гладкой и замкнутой фазы Cu_3Sn толщиной до 2 мкм (припой SnAgCu) или до 4 мкм (припой SnPb).

Металлизация контактов компонентов из никеля предотвращает возникновение интерметаллических фаз Cu_xSn_y во время процесса оплавления для припоя SnAgCu. Вместо этого на пограничном слое образуется тонкая игольчатая фаза Ni_3Sn_4 . Толщина этой фазы колеблется в области от <1 до 1,5 мкм. Часть фазы Ni_3Sn_4 растворяется в припое еще в процессе пайки. Во время высокотемпературной нагрузки она вырастает до плоской фазы $(Ni_x, Cu_y)_3Sn_4$ и на ней образуется холмообразная фаза $(Cu_x, Ni_y)_6Sn_5$. Фаза $(Cu_x, Ni_y)_6Sn_5$ достигает после t_{HTS3} толщины от 1 до 8 мкм.

В исходном состоянии паяные контакты SnPb имеют на границе с контактом компонента холмообразные и частично пальцеvidно сформированные фазы Cu_3Sn и Cu_6Sn_5 . При этом толщина этих фаз в сглаженных областях составляет около 1 мкм (Cu_3Sn) или около 1–2 мкм (Cu_6Sn_5). В пальцеvidно сформированных областях наблюдается частичный отрыв фаз в припой. После температурной нагрузки до t_{HTS2}

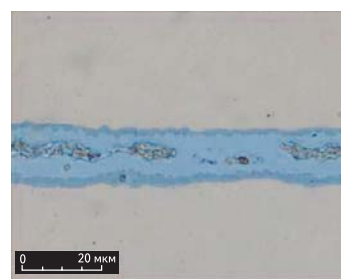


Рис. 7. Сростание фаз Cu_6Sn_5 приграничных слоев подложка-припой и припой-контакт компонента в паяном соединении SnPb (зазор ≤ 15 мкм)

фаза Cu_3Sn вырастает до планарной фазы с толщиной от 1 до 5 мкм, а фаза Cu_6Sn_5 вырастает до планарной фазы с толщиной от 3 до 8 мкм.

В паяных контактах SnPb с зазором паяного соединения ≤ 15 мкм после температурной нагрузки до t_{HTS2} можно наблюдать сростание фаз Cu_6Sn_5 обоих приграничных слоев (рис. 7).

Влияние электрического тока на рост приграничных слоев и структуру соединения

Анализ микроструктуры паяных соединений из обоих применяемых припоев не выявил каких-либо изменений, связанных с нагрузкой электрическим током (рис. 8). В паяных соединениях, которые нагружались электрическим током со значениями I_1 , I_2 или I_3 при температуре T_{EM1} , не было зафиксировано укрупнения микроструктуры. На рис. 9 показана микроструктура паяных соединений SnAgCu после проведения экспериментов при I_1 (а) и I_3 (б) при температуре T_{EM1} . Хорошо видна одинаково крупная микроструктура обоих контактов. Эксперименты, которые проводились при токе I_1 и температуре T_{EM2} , вели к более значительному укрупнению микроструктуры. На рис. 8 I–б и II–б показано, что укрупнение микроструктуры вследствие этого испытания на электромиграцию слабее по сравнению с паяными контактами после температурной нагрузки до t_{HTS2} . Паяные контакты, которые нагружались токами I_1 или I_2 при температуре T_{EM3} , имеют похожее укрупнение микроструктуры по сравнению с паяными контактами после температурной нагрузки до t_{HTS2} .

На пограничном слое между медной металлизацией подложки и припоем не было обнаружено влияния эффекта электромиграции на рост

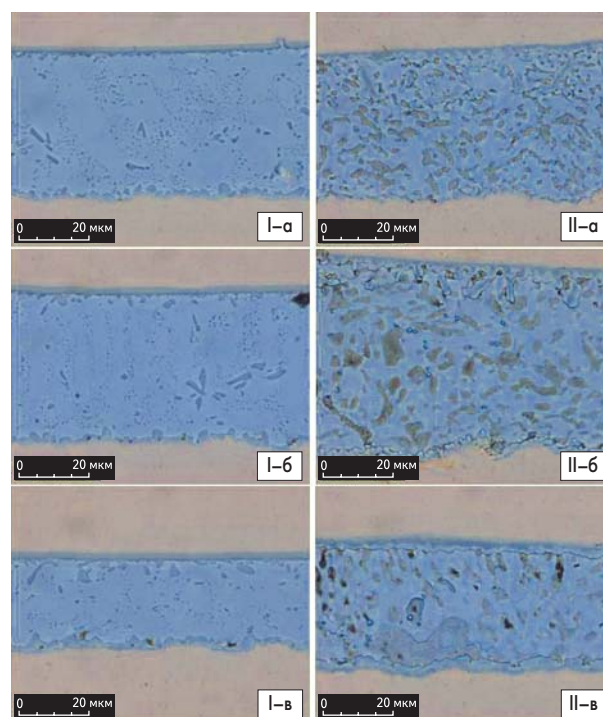


Рис. 8. Укрупнение микроструктуры паяных контактов SAC (I) и SnPb (II) после экспериментов с $I = I_1$: а) при $T_{EM} = T_{EM1}$; б) T_{EM2} ; в) T_{EM3}

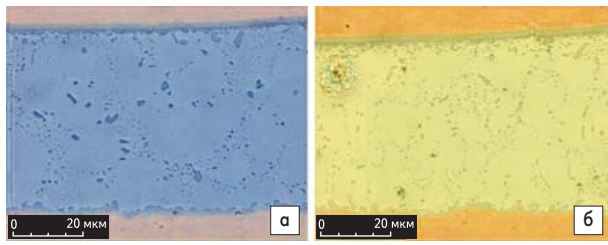


Рис. 9. Укрупнение микроструктуры паяных контактов после нагрузки электрическим током при T_{EM1} : а) $I = I_1$; б) $I = I_3$

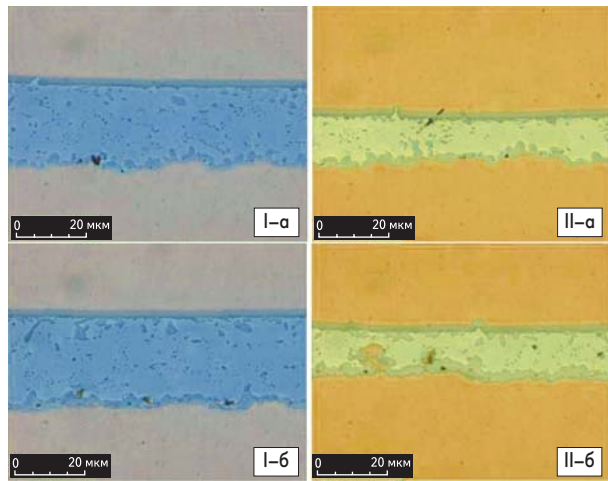


Рис. 10. Частичный рост фазы $(Cu_x, Ni_y)_6Sn_5$ при нагрузке током I_1 (I) и I_2 (II) и при температурах: а) T_{EM2} ; б) T_{EM3}

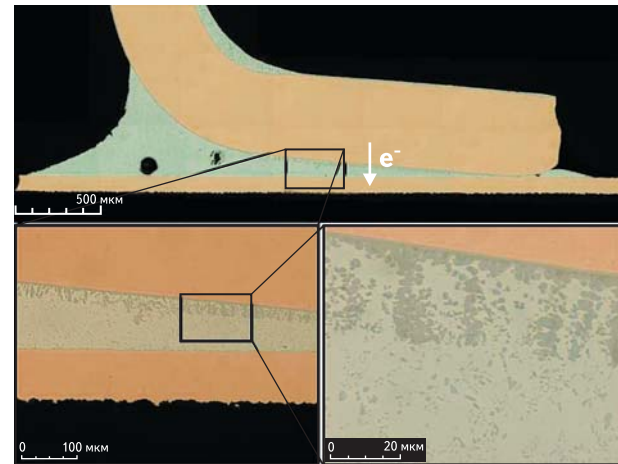


Рис. 11. Рост интерметаллической фазы $(Ni_x, Cu_y)_3Sn_4$ в паяных контактах SnAgCu на пограничном слое между контактом компонента и припоем ($I = I_2 @ T_{EM} = T_{EM2}$)

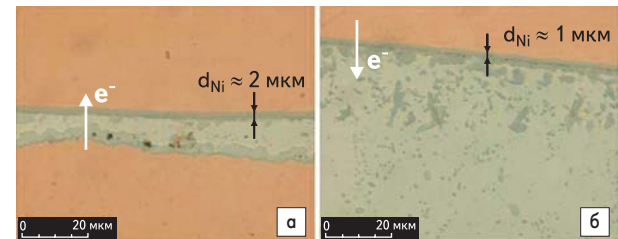


Рис. 12. Сокращение толщины никелевой металлизации под выросшей фазой $(Ni_x, Cu_y)_3Sn_4$ в паяном контакте SnAgCu после нагрузки током со значением I_2 при температуре T_{EM3} : подложка соединена а) с положительным полюсом; б) с отрицательным полюсом источника питания

интерметаллических фаз для обоих тестируемых припоев. В зависимости от температуры испытаний, но независимо от нагрузки электрическим током на этом пограничном слое происходит рост интерметаллических фаз Cu_3Sn и Cu_6Sn_5 в обоих припоях (рис. 8 I–а до (SAC) и II–а до (SnPb)). Такой же вывод действителен и для пограничного слоя между контактом компонента и припоем SnPb.

В противоположность результатам температурной нагрузки на пограничном слое контакта компонента и припоя SnAgCu после испытаний на электромиграцию не было обнаружено образования гладкой фазы $(Cu_x, Ni_y)_6Sn_5$. Изначально имеющаяся фаза Ni_3Sn_4 переходит в фазу $(Ni_x, Cu_y)_3Sn_4$. На рис. 10 показано, что только при значениях температуры T_{EM2} и T_{EM3} в некоторых местах был зафиксирован рост фазы $(Cu_x, Ni_y)_6Sn_5$. При сравнении результатов испытаний с нагрузкой электрическим током при различных значениях температуры можно предположить существование зависимости роста фазы $(Cu_x, Ni_y)_6Sn_5$ в некоторых местах. Чем выше значение температуры нагрузки, тем интенсивнее рост фазы $(Cu_x, Ni_y)_6Sn_5$. Напротив, при постоянном значении температуры зависимость от тока нагрузки исчезает. Так, при проведении экспериментов при температуре T_{EM1} не был зафиксирован рост фазы $(Cu_x, Ni_y)_6Sn_5$ независимо от тока нагрузки. Показателем для этого феномена может служить характерное различие в росте интерметаллических фаз на пограничном слое между

контактом компонента и припоем SnAgCu при сравнении паяных контактов после температурной нагрузки до t_{HTS2} (рис. 6 I–в) с паяными контактами после нагрузки током со значением I_1 при температуре T_{EM3} (рис. 8 I–в).

В паяных контактах SnAgCu, которые соединены положительным полюсом с источником питания, на пограничном слое между контактом компонента и припоем можно наблюдать рост пальцевидной интерметаллической фазы, который не был зафиксирован в экспериментах с температурной нагрузкой (рис. 11). Положение на металлизации из никеля, направление течения электронов и окраска в металлографических срезах дают основания предполагать, что это фаза $(Ni_x, Cu_y)_3Sn_4$. На рис. 12 также видно, что толщина никелевой металлизации под выросшей фазой уменьшилась с $d_{Ni} \approx 2$ мкм до $d_{Ni} \approx 1$ мкм. На рис. 11 видно, что фаза $(Ni_x, Cu_y)_3Sn_4$ растет в областях со средним зазором припоя. Под контактом компонента, загнутым вверх, и в области с наименьшим зазором припоя рост пальцеобразной фазы $(Ni_x, Cu_y)_3Sn_4$ зафиксирован не был.

Обсуждение наблюдаемых эффектов

Не было зафиксировано укрупнения или изменения микроструктуры паяных контактов из припоев SnAgCu и SnPb при нагрузке электрическим током. Зафиксированное укрупнение микроструктуры усиливается при увеличении температуры испытаний и про-

исходит независимо от тока нагрузки. Поэтому данный эффект должен рассматриваться исключительно как вызванный температурной нагрузкой. Этот тезис поддерживается предположением, что даже при самом высоком значении нагрузки I_3 в контакте компонента ТО плотность тока меньше, чем в экспериментах с контактами Flip-Chip или в проводниках полупроводниковых элементов [2]. Из чего следует вывод, что дополнительное разрушение паяного контакта и тем самым сокращение надежности соединения из-за укрупнения микроструктуры из-за нагрузки электрическим током невозможно.

Также не было установлено влияния электрического тока на рост интерметаллических фаз на границе между припоем (SAC и SnPb) и подложкой или контактом компонента. Лишь на границе между припоем SnAgCu и никелевой металлизацией контакта компонента можно было наблюдать процессы, вызванные нагрузкой электрическим током. В то время как при исключительно температурной нагрузке происходит рост гладкой фазы $(Cu_x, Ni_y)_6Sn_5$, при испытаниях на электромиграцию со значением тока $I \geq I_1$ эта фаза образуется лишь в некоторых областях. При этом направление и сила тока (I_1 , I_2 или I_3) не имеют значения. Так как никелевая металлизация препятствует поступлению меди из контактных штырьков, рост фазы $(Cu_x, Ni_y)_6Sn_5$ зависит от диффузии меди из медного покрытия подложки. Поток электронов в противоположном направлении может препятствовать

или нарушать этот механизм. Что негативно влияет на рост фазы в паяных соединениях с потоком электронов в направлении контакта компонента, должно быть еще проанализировано. Возможно, что диффузия меди вдоль границ зерен нарушена и в этом направлении потока электронов, если они расположены не параллельно. Отсутствие никелевого покрытия и близость к меди в подложке или в контакте компонента препятствуют аналогичному результату на всех других пограничных слоях. В данном случае рост интерметаллических фаз происходит аналогично тому, как при высокотемпературной нагрузке.

Рост пальцевидной фазы $(Ni_x, Cu_y)_3Sn_4$ на границе между припоем и контактом компонента можно было наблюдать в паяных соединениях, которые соединены со стороны подложки с положительным полюсом источника питания. Поэтому причиной этого эффекта является, скорее всего, поток электронов от контакта компонента в направлении паяного соединения и связанный с этим перенос никеля. Прерывание или сдерживание диффузии меди из медного покрытия подложки также положительно влияет на рост этой фазы с большим содержанием никеля. В связи с недостаточным наличием меди в этой области фаза $(Ni_x, Cu_y)_3Sn_4$ не может быть преобразована в фазу $(Cu_x, Ni_y)_6Sn_5$. Сокращение толщины никелевого покрытия также указывает на образование фазы $(Ni_x, Cu_y)_3Sn_4$ и связанный с этим расход слоя никеля. Причина роста фазы $(Ni_x, Cu_y)_3Sn_4$ на местах со средним зазором припоя должна быть в дальнейшем более подробно исследована. Необходимо исследовать также влияние нарушенного роста фазы $(Cu_x, Ni_y)_6Sn_5$ и наличие пальцевидной

фазы $(Ni_x, Cu_y)_3Sn_4$ на надежность паяного соединения.

Значительные изменения в образовании интерметаллических фаз, которые наблюдались в экспериментах на контактах Flip-Chip, в данных испытаниях на контактах ТО зафиксированы не были. Решающим фактором для этого могут быть значительно меньшие плотности тока и их распределение. В контактах ТО также вряд ли возможны локальные превышения плотности тока, вызываемые эффектом неравномерного распределения тока.

Обобщение результатов исследования

Следующие эффекты наблюдались в испытываемых паяных соединениях: в паяных соединениях SnAgCu и SnPb происходит укрупнение микроструктуры и рост интерметаллических фаз во время температурной нагрузки до t_{HTS3} . Нагрузка электрическим током со значением $I = I_1, I_2$ или I_3 не вызывает укрупнения микроструктуры в припоях SnAgCu и SnPb. Укрупнение микроструктуры при исследовании электромиграции может быть определено как эффект, вызванный исключительно температурной нагрузкой. Наличие тока нагрузки не оказывает влияния на рост фаз Cu_xSn_y на границе между медной металлизацией подложки и припоем SnAgCu или SnPb. Это также происходит на границе между припоем SnPb и контактом ТО. Рост интерметаллической фазы $(Cu_x, Ni_y)_6Sn_5$ на границе между припоем SnAgCu и контактом ТО нарушается при нагрузке электрическим током. Причиной этому является нарушение диффу-

зии меди. При этом направление тока не имеет значения. На границе между припоем SnAgCu и контактом ТО со слоем никеля происходит рост пальцевидной фазы $(Ni_x, Cu_y)_3Sn_4$, если контакт ТО соединен с отрицательным полюсом источника питания. Причиной этому являются поток электронов, направленный от контакта ТО, и прерванная или сокращенная диффузия меди из медного покрытия подложки.

Литература

1. Black J. R. Electromigration Failure Modes in Aluminium Metallization for Semiconductor Devices. Proceedings of the IEEE, Vol.57, No. 9 (1969).
2. Blech I. A. Electromigration in thin aluminum films on titanium nitride // Journal of Applied Physics, Vol. 47, No. 4 (1976).
3. Liang L. H. Electro-Migration Study in Solder Joint and Interconnects of IC packages. Proceedings 7th EuroSimE Conference, 2006.
4. Hua Ye. Numerical Simulation of Stress Evolution During Electromigration in IC Interconnect Lines. IEEE Trans.on Components and Packaging Technologies, Vol. 26, No. 3 (2003).
5. Yeh E. C. C. Current-crowding-induced electromigration failure in flip chip solder joints. Applied Physics Letters, Vol. 80, No. 4 (2002).
6. Auerbach F. Power-Cycling-Stability of IGBT-Modules. IEEE Industry Applications Society, Annual Meeting, New Orleans, 1997.

Примечание. Оригинал статьи опубликован в журнале PLUS (Produktion von Leiterplatten und Systemen, 2007, № 7, Германия).