

В. К. Василец, А. А. Хмыль, Л. К. Кушнер, И. И. Кузьмар

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОЛИЗА НА ОБРАЗОВАНИЕ «УСОВ» В ПОКРЫТИЯХ НА ОСНОВЕ ОЛОВА

Статья посвящена исследованию потенциальных дефектов, которые могут появиться в тонкопленочных электрохимических покрытиях на основе олова, не содержащих свинца, при их длительном хранении. Целью исследования является разработка технологических режимов электролиза, обеспечивающих минимизацию вероятности появления таких дефектов и надежную работу радиоэлектронной аппаратуры. Рассмотрены проблемы применения олова и бессвинцовых сплавов на его основе в радиоэлектронике, а также методы борьбы с такими потенциальными дефектами, как образование «усов». Для контроля роста «усов» в послеэлектролизный период (12 месяцев естественного старения в условиях лаборатории) было выбрано покрытие Sn-Bi, которое формировали с использованием как постоянного, так и импульсно-реверсированного токов. На основании результатов, полученных с помощью растрового электронного микроскопа, установлено, что осаждение сплава с использованием импульсного и реверсированного тока не только улучшает структуру формируемых покрытий, но и существенно снижает склонность к образованию «усов», их длину и плотность на единицу площади в сравнении с покрытиями, полученными на постоянном токе. Установлены возможные причины достижения высокого качества электрохимических покрытий сплавом Sn-Bi. Наиболее медленный рост «усов» отмечен на реверсированном токе со средней плотностью $i_{cp} = 2 \text{ A/dm}^2$, частоте $f = 1 \text{ Гц}$ и коэффициенте заполнения $\gamma = 1,5$.

Ключевые слова: бессвинцовые сплавы, нестационарный электролиз, «усы»

V. K. Vasilets, A. A. Khmyl, L. K. Kushner, I. I. Kuzmar

Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

THE EFFECT OF ELECTROPLATING PARAMETERS ON TIN “WHISKERS” FORMATION

The article is devoted to the investigation of potential defects that can appear in thin-film electrochemical coatings based on tin, which do not contain lead, during their long storage. The purpose of the study is to develop technological regimes of electrolysis, which ensure minimization of the probability of the appearance such defects and reliable operation of radio electronic equipment. The problems of tin and lead-free alloys based on it, as well as methods of elimination of such potential defects as the formation of “whiskers” are considered. To control the growth of “whiskers” in the post-electrolysis period (12 months of natural aging under laboratory conditions), a Sn-Bi coating was chosen, which was formed using both a constant and a pulse-reversed current. Based on the results which were obtained with scanning electron microscope, it was established that deposition of an alloy using pulsed and reverse current not only improves the structure of the coatings formed, but also significantly reduces the propensity to form whiskers, their length and density per unit area in comparison with coatings obtained with direct current. Possible reasons for achievement of high quality electrochemical coatings with Sn-Bi alloy have been established. The slowest growth of “whiskers” was obtained at reversed current with an average density $i_{av} = 2 \text{ A/dm}^2$, frequency $f = 1 \text{ Hz}$ and duty ratio $\gamma = 1.5$.

Keywords: lead-free alloys, non-stationary electrolysis, “whiskers”

Введение. Электрохимические покрытия широко применяются в производстве электронной техники для улучшения функциональных свойств используемых конструкционных материалов. Среди них по объему использования выделяются покрытия под пайку, которые во многом определяют надежность работы электронных приборов. Гальванические сплавы, имеющие относительно невысокую температуру плавления, используются в технологии посадки кристаллов интегральных схем (ИС) в корпус, создания многокристальных модулей, микроэлектромеханических систем (МЭМС), производстве печатных плат и т. д. [1]. Значительным преимуществом гальванического метода нанесения тонких пленок под пайку является легкость управления толщиной осаждаемого металла и отсутствие нагрева, а следовательно, и изменений структуры материала изделия и возможной его деформации. Проблемой, существующей в этой области на сегодняшний день, остается создание паяемых при низкой температуре тонкопленочных материалов, не содержащих свинец, который является экологически опасным металлом. В соответ-

ствии с директивами Restriction of Hazardous Substances (RoHS) и RoHS2 в Европейском союзе запрещено в законодательном порядке применение ряда опасных материалов, в том числе свинца, в изделиях, используемых в производстве радиоэлектронной аппаратуры [2]. Большинство технологически развитых стран мира поддерживали требования RoHS, и теперь на рынок поступают компоненты, ориентированные на бессвинцовые технологии.

С переходом на бессвинцовую технологию многие производители стали применять чистое матовое олово для покрытия выводов и контактных поверхностей компонентов. Однако олово обладает следующими недостатками: аллотропическое превращение β -модификации металлического олова в полупроводящий серый порошок α -модификации («оловянная чума») и образование «усов» олова («whiskers») [3]. Первая проблема успешно решается легированием олова, при котором атомы примеси в кристаллической решетке олова препятствуют его структурной перестройке. Вторая проблема олова (образование «усов») – явление, известное с середины XX в., однако в микроэлектронике ему уделялось мало внимания, поскольку рост оловянных «усов» не происходил при наличии в достаточном количестве примеси свинца в сплаве [4]. «Усы» вызывают серьезную опасность замыкания соседних элементов проводящего рисунка печатной платы, кроме того, изгибаясь или отрываясь, они могут образовывать проводящие перемычки между токоведущими поверхностями. По мнению ряда исследователей [5–8], основной причиной образования «усов» считается возникновение внутренних напряжений сжатия в слоях олова, что может быть следствием появления неравновесных точечных дефектов, коррозии, образования интерметаллидов на границе основы и покрытия, окисления осадка, механического воздействия, циклического изменения температуры, включения примесей в металл покрытия. Быстрее всего появляются оловянные «усы» на латунных подложках, что связывают с миграцией цинка в покрытие (рис. 1, *a, b*). В пользу преимущественного влияния интерметаллидов говорит отсутствие «усов» на поверхности покрытия сплавом олово-висмут, нанесенного на кремний с подслоем никеля, после 1 года хранения в условиях лаборатории (рис. 1, *c, d*).

Снизить внутренние напряжения пытаются, контролируя размер и форму зерна, ориентацию кристаллитов. В [9] предпринята попытка связать преимущественную ориентацию зерен и склонность к росту «усов», основываясь на гипотезе, что текстурированные покрытия имеют меньшее число дислокаций и величину внутренних напряжений. В результате работы явной

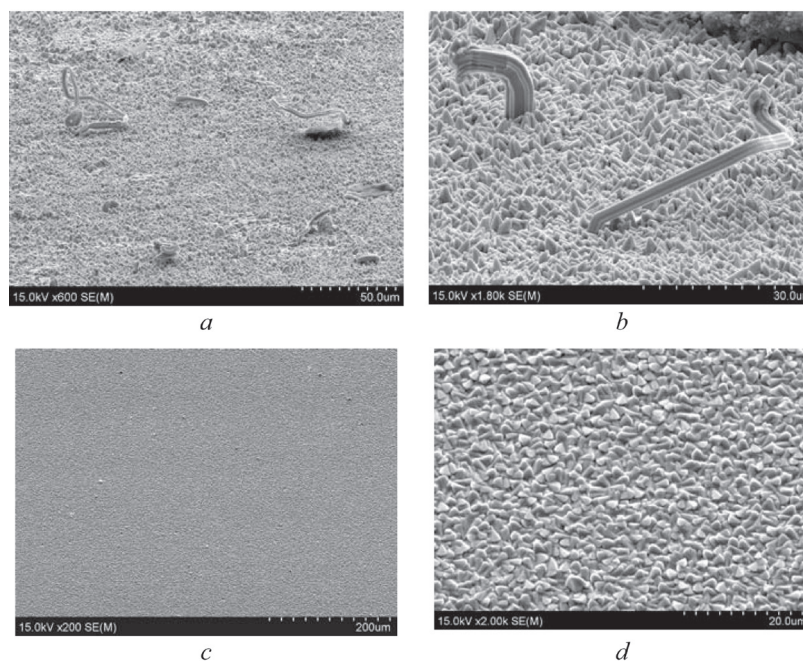


Рис. 1. Микрофотографии рельефа поверхности покрытий сплавом Sn-Bi, нанесенных без подслоя на Cu-Zn (*a, b*) и Si с подслоем Ni (*c, d*); *a* – $\times 200$, *b* – $\times 2000$, *c* – $\times 600$, *d* – $\times 1800$

Fig. 1. SEM images of the surface of Sn-Bi alloy deposited on Cu-Zn without underlayer (*a, b*) and Si- with Ni-sublayer (*c, d*); *a* – $\times 200$, *b* – $\times 2000$, *c* – $\times 600$, *d* – $\times 1800$

связи степени текстурированности осадков и возникновения «усов» не обнаружено, покрытия со случайной ориентацией зерен имеют схожий характер роста «усов».

Для устранения возможности появления «усов» вследствие формирования интерметаллидов на границе основы и покрытия рекомендуется осаждать олово и сплавы на его основе на медь и медные сплавы по никелевому подслою. Однако данный метод значительно увеличивает количество операций технологического процесса. Другим возможным путем решения проблемы является применение нестационарного электролиза, при котором, изменяя ток по определенным законам, можно в широких пределах регулировать структуру и качество получаемых систем металлизации. В этом случае по сравнению с электролизом на постоянном токе нарушается обычный ход образования и роста кристаллов, происходит периодическое перераспределение центров кристаллизации и растущих граней кристалла, что приводит к изменению структуры катодного осадка и его свойств.

Методика эксперимента. В настоящей работе исследовано влияние режима электролиза на рост «усов» в покрытии сплавом олово-висмут, нанесенном без подслоя на латунь. Осадки получали из электролита следующего состава: олово сернокислое SnSO_4 (50 г/л); висмут азотнокислый $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$ (1,4 г/л); кислота серная H_2SO_4 (125 г/л); добавка антиоксидантная ЦКН-32 (2 г/л). В качестве поверхностно-активного вещества (ПАВ) применяли неонол АФ-9-10 (4 г/л); температура электролита – 18–25 °С. Для приготовления раствора использовали реактивы марки «ч.д.а.» и дистиллированную воду. Электроосаждение проводили на высокочастотном источнике питания гальванической ванны импульсно-реверсным током ИП 15-5 в комплекте с управляющей ЭВМ. Толщина всех осадков 5 мкм. Микрорельеф поверхности исследовали с помощью растрового электронного микроскопа S-4800 после естественного старения в течение 12 месяцев в условиях лаборатории.

Результаты и их обсуждение. На рис. 2 представлены при различном увеличении снимки поверхности покрытий оловом и сплавом олово-висмут, полученных на постоянном токе. Как видно из этого рисунка, на поверхности обоих покрытий с течением времени появляются «усы».

Это можно объяснить тем, что в условиях протекающей при комнатной температуре рекристаллизации примесные атомы и ПАВ под действием градиента напряжений ингибируют границы зерен, затрудняя самодиффузию. При достижении некоторого критического размера зер-

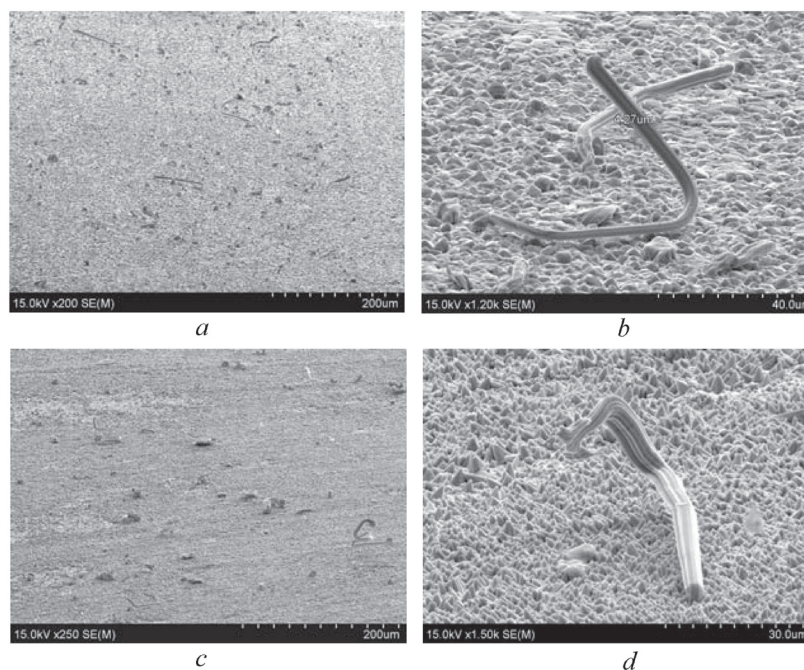


Рис. 2. Микрофотографии рельефа поверхности покрытий Sn (*a, b*) и сплавом Sn-Bi (*c, d*), полученных на постоянном токе, $i = 2,0 \text{ A/dm}^2$; *a* – $\times 200$, *b* – $\times 1200$, *c* – $\times 250$, *d* – $\times 1500$

Fig. 2. SEM images of Sn coatings (*a, b*) and Sn-Bi alloys (*c, d*) obtained at constant current, $i = 2,0 \text{ A/dm}^2$; *a* – $\times 200$, *b* – $\times 1200$, *c* – $\times 250$, *d* – $\times 1500$

на его границы полностью теряют способность перемещаться и продолжающийся подвод атомов вызывает рост кристалла в область над поверхностью осадка. Однако влияние примесей в данной ситуации различно. Так, примеси цинка, кадмия, мышьяка ускоряют появление «усов», а примеси никеля, кобальта значительно замедляют этот процесс [10]. Сравнение снимков поверхностей чистого олова (рис. 2, *a, b*) и сплава олово-висмут (рис. 2, *c, d*), сформированных на постоянном токе, показывает, что при введении добавки висмута изменяется микроструктура осадка и снижается количество нитевидных кристаллов с 76 до 27 на участке площадью 300×400 мкм (то есть снижается плотность появления «усов» с 633 до 225 шт./мм²), уменьшается их длина – в среднем от 101 до 65 мкм. Как видно из рис. 2, *c, d*, формирование легкоплавкого сплава олово-висмут с долей висмута 0,23 мас.% не решает проблемы образования «усов» полностью. Тем не менее примеси висмута в осадке стабилизируют структурные дефекты и приводят к замедлению процесса снижения внутренних напряжений в послеэлектролизный период по сравнению с осадками чистого олова.

В процессе электроосаждения на импульсном токе из-за высоких мгновенных значений катодной плотности тока разряд ионов происходит при более отрицательных значениях потенциала по сравнению с режимами стационарного электролиза. Тем самым обеспечивается измельчение структуры покрытий и увеличение числа дефектов кристаллической решетки [11]. Получение более плотного и однородного осадка с планарным ростом кристаллитов с помощью импульсных режимов электролиза (рис. 3) ослабляет рост «усов». Они становятся короче и реже появляются (20 «усов» на участке площадью 300×400 мкм, плотность появления 167 шт./мм²). Повышение частоты импульсного тока от 100 Гц (рис. 3, *a, b*) до 1000 Гц (рис. 3, *c–e*) при скважности 5 способствует их удлинению от 25 до 61 мкм соответственно. Следует отметить, что при данных режимах доля висмута в покрытии составляет всего 0,04–0,06 мас.%.

Реверсированный ток (рис. 4), несмотря на равномерную структуру осадка, приводит к высокой плотности (4000 шт./мм²) образования крючкообразных усов небольшой длины (до 10,2 мкм). Полученные «усы» олова схожи по форме и размеру с полученными Ron Gedney [12] «усами» на поверхности покрытий Sn-Pb и Sn-Ag после 3000 циклов термоциклирования, где они считались незначительными и наиболее безопасными с точки зрения надежности работы электронной техники.

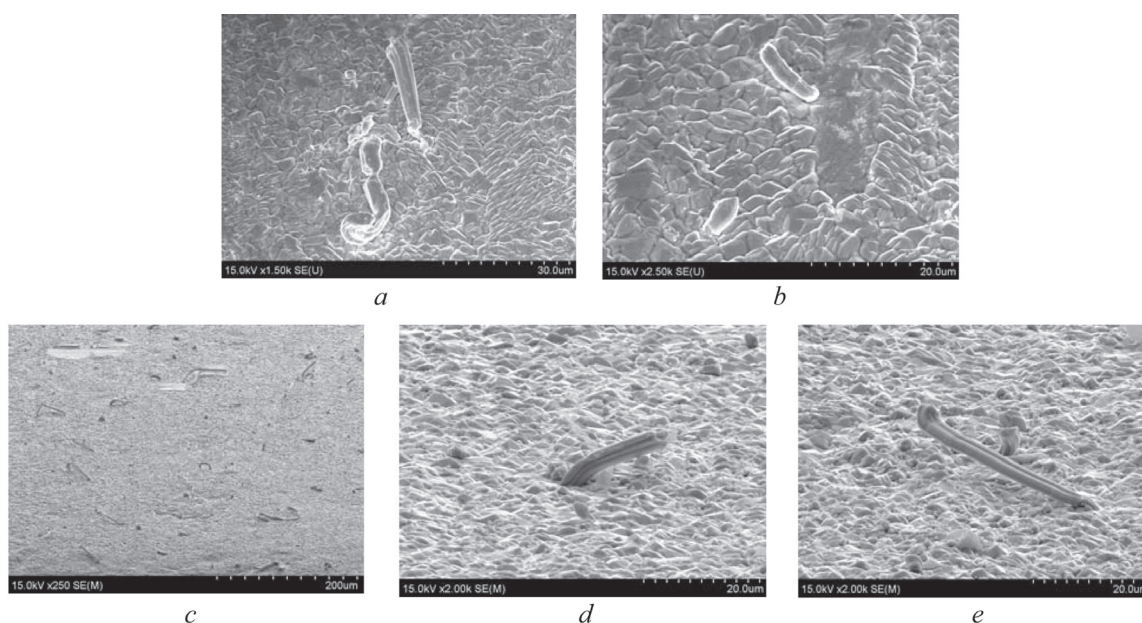


Рис. 3. Микрофотографии рельефа поверхности сплава Sn-Bi, полученного при электролизе импульсным током, $i_{cp} = 2,0$ А/дм², скважность $q = 5$, $f = 100$ Гц (*a, b*) и $f = 1000$ Гц (*c–e*); $a - \times 1500$, $b - \times 2500$, $c - \times 250$; $d, e - \times 2000$

Fig. 3. SEM images of Sn-Bi alloys obtained at pulsed current, $i_{av} = 2.0$ A/dm², $q = 5$, $f = 100$ Hz (*a, b*) and $f = 1000$ Hz (*c–e*); $a - \times 1500$, $b - \times 2500$, $c - \times 250$; $d, e - \times 2000$

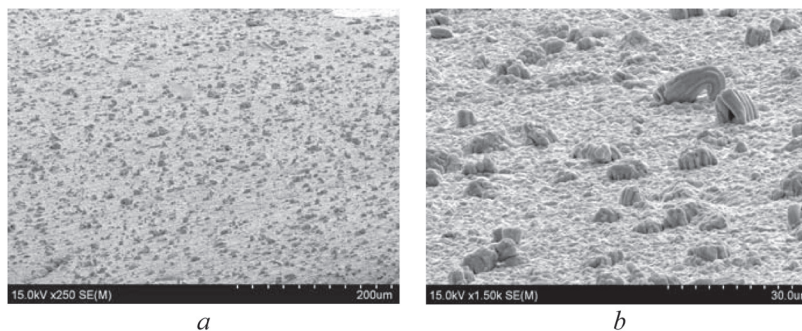


Рис. 4. Микрофотографии рельефа поверхности сплава Sn-Bi, полученного при электролизе реверсированным током, $i_{cp} = 2,0 \text{ A/dm}^2$, $f = 1 \text{ Гц}$, $\gamma = 1,5$; $a - \times 250$, $b - \times 1500$

Fig. 4. SEM images of Sn-Bi alloys obtained at reversed current, $i_{av} = 2.0 \text{ A/dm}^2$, $f = 1 \text{ Hz}$, $\gamma = 1.5$; $a - \times 250$, $b - \times 1500$

Возможным фактором влияния на длину и форму «усов» может быть пористость осадка. Авторы [13] высказали идею о том, что пористость помогает снижать внутренние напряжения в тонких пленках. Наличие множества несквозных пор в покрытии, полученном на реверсированном токе низкой частоты, может объясняться механизмом электрокристаллизации таких покрытий, когда действие обратного импульса заключается либо в частичном растворении покрытия, либо в изменениях, связанных с пассивированием осадка [11]. При относительно большом количестве электричества в обратных импульсах при значительных длительностях их протекания растворяются не только грани растущих кристаллов, но и границы зерен. Возможно также обнажение на плоских гранях растущих кристаллов дислокаций. Формирование большого числа микрослоев растущего осадка приводит к множественному перекрыванию возможных пор. В послеэлектролизный период процессы фазовых и структурных превращений в металлах происходят путем перегруппировки атомов, совершающих скачкообразные переходы в вакансионные узлы кристаллической решетки. Интенсивность этого процесса определяется потенциальным барьером, который характеризуется величиной энергии активации самодиффузии [14]. Поры действуют как «ловушки» для вакансий и тем самым понижают значение этой энергии [15]. Таким образом, наличие множества перекрывающихся пор в осажденном покрытии создает более «извилистые» пути диффузии атомов и тем самым замедляет рост «усов», в результате чего последние имеют крючкообразную форму и небольшую длину (см. рис. 4).

Таким образом, варьируя параметры электролиза и тем самым изменяя пористость осадка, его микроструктуру и количественный состав, становится возможным контролировать характер роста «усов». Влияние частоты реверсированного тока (1 и 1000 Гц) на микрорельеф поверхности и образование нитевидных «усов» приведено на рис. 5.

Из рисунка видно, что с помощью реверсированного тока формируется равномерная мелкокристаллическая микроструктура. На покрытии, сформированном на частоте 1 Гц, она более мелкокристаллическая, однако плотность «усов» на такой поверхности больше. Содержание висмута в обоих случаях примерно одинаково (0,44 и 0,47 мас.%). Несмотря на это, их длина при частоте 1 Гц существенно меньше, чем на покрытиях, полученных при 1000 Гц. Встречаются нитевидные кристаллы длиной до 27 мкм, средняя длина подавляющего большинства равна ~7 мкм. При использовании частоты 1000 Гц «усы» встречаются реже (плотность появления 200 шт./мм²), вместе с тем их длина возросла до 30,3 мкм. Встречаются даже изогнутые нити длиной 80,2 мкм.

При электроосаждении на реверсированном токе еще одним параметром для варьирования может быть коэффициент заполнения импульсов, который характеризует степень заполнения энергией периода колебаний и находится по формуле

$$\gamma = \frac{\tau_{пр} + \tau_{обр}}{\tau_{пр} - \tau_{обр}},$$

где $\tau_{пр}$ – длительность прямого (катодного) импульса, $\tau_{обр}$ – длительность обратного импульса.

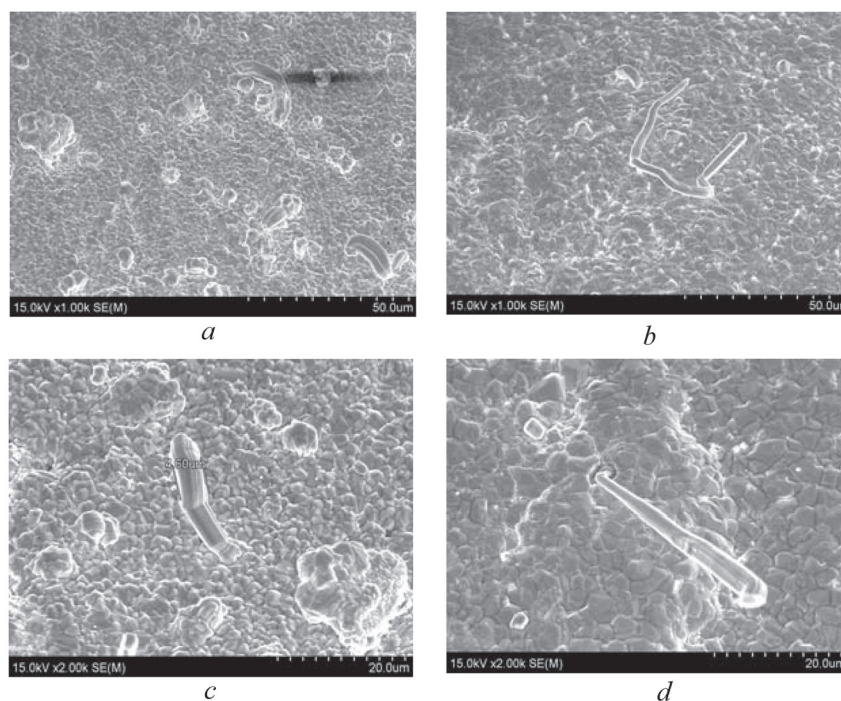


Рис. 5. Микрофотографии рельефа поверхности сплава Sn-Bi, полученного при электролизе реверсированным током, после 1 года хранения, $i_{cp} = 2,0 \text{ A/дм}^2$, $\gamma = 1,5$; $a-f = 1 \text{ Гц}$, $\times 1000$; $b-f = 1000 \text{ Гц}$, $\times 1000$; $c-f = 1 \text{ Гц}$, $\times 2000$; $d-f = 1000 \text{ Гц}$, $\times 2000$

Fig. 5. SEM images of Sn-Bi alloys, obtained at reversed current, after 1 year of storage, $i_{av} = 2.0 \text{ A/dm}^2$, $\gamma = 1.5$; $a-f = 1 \text{ Hz}$, $\times 1000$; $b-f = 1000 \text{ Hz}$, $\times 1000$; $c-f = 1 \text{ Hz}$, $\times 2000$; $d-f = 1000 \text{ Hz}$, $\times 2000$

Как видно из рис. 5, a , c и b при частоте 1 Гц с повышением коэффициента заполнения импульсов от 1,1 до 1,5, то есть с уменьшением длительности катодного импульса и увеличением длительности анодного, покрытие формируется с более однородной по размеру зерна структурой, с одинаково ориентированными гранями кристаллитов, растущими в тангенциальном направлении. Плотность «усов» с повышением γ значительно возрастает при одновременном уменьшении длины. Ее значение снижается с максимального значения 83,8 мкм при $\gamma = 1,1$ до максимального 27 мкм при $\gamma = 1,5$. Стоит отметить, что средняя длина большинства нитевидных кристаллов при $\gamma = 1,5$ равна ~ 7 мкм.

При повышении частоты реверсированного тока при формировании осадка до 1000 Гц плотность появления «усов» при различных коэффициентах заполнения примерно одинакова (рис. 5, b , d ; 7). Однако их длина так же, как и при частоте тока 1 Гц, существенно возрастает с понижением величины γ до 1,1. Максимальная длина при $\gamma = 1,5$ равна 80,2 мкм, а при $\gamma = 1,1$ – 130,7 мкм. Таким образом, коэффициент заполнения импульсов оказывает заметное влияние на рост «усов», значительно повышая их длину со снижением своего значения. Более высокая частота импульсов также приводит к увеличению длины «усов».

Влияние средней плотности тока на микрорельеф поверхности отражено на рис. 5, a , c и 8. Из представленных снимков видно, что режим с использованием средней плотности тока $2,0 \text{ A/дм}^2$ предпочтительнее, чем при $1,0 \text{ A/дм}^2$. Микроструктура покрытия однородная, сглаженная с планарным ростом кристаллитов. Содержание висмута при $i_{cp} 1,0$ и $2,0 \text{ A/дм}^2$ – 0,42 и 0,44 мас.% соответственно. Плотность появления «усов» при $i_{cp} = 2,0 \text{ A/дм}^2$ выше, однако их рост осуществляется гораздо медленнее. Максимальная длина при средней плотности тока $1,0 \text{ A/дм}^2$ – 43,3 мкм, при $2,0 \text{ A/дм}^2$ – 27 мкм. В работах [7, 16] отмечено увеличение пористости покрытия и замедление процесса роста «усов» при повышении плотности тока. Вероятно, и при нестационарном электролизе действует эта закономерность, что подтверждают данные, полученные в результате исследования.

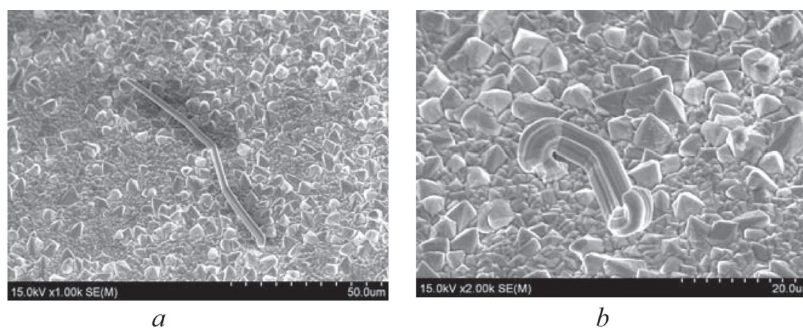


Рис. 6. Микрофотографии рельефа поверхности сплава Sn-Bi, полученного при электролизе реверсированным током, после 1 года хранения, $i_{cp} = 2,0 \text{ A/dm}^2$, $f = 1 \text{ Гц}$, $\gamma = 1,1$; $a - \times 1000$, $b - \times 2000$

Fig. 6. SEM images of Sn-Bi alloys, obtained at reversed current, after 1 year of storage, $i_{av} = 2.0 \text{ A/dm}^2$, $f = 1 \text{ Hz}$, $\gamma = 1.1$; $a - \times 1000$, $b - \times 2000$

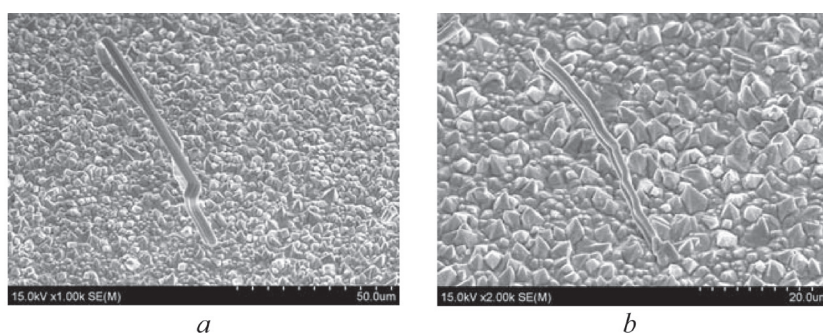


Рис. 7. Микрофотографии рельефа поверхности сплава Sn-Bi, полученного при электролизе реверсированным током, после 1 года хранения, $i_{cp} = 2,0 \text{ A/dm}^2$, $f = 1000 \text{ Гц}$, $\gamma = 1,1$; $a - \times 1000$, $b - \times 2000$

Fig. 7. SEM images of Sn-Bi alloys, obtained at reversed current, after 1 year of storage, $i_{av} = 2.0 \text{ A/dm}^2$, $f = 1000 \text{ Hz}$, $\gamma = 1.1$; $a - \times 1000$, $b - \times 2000$

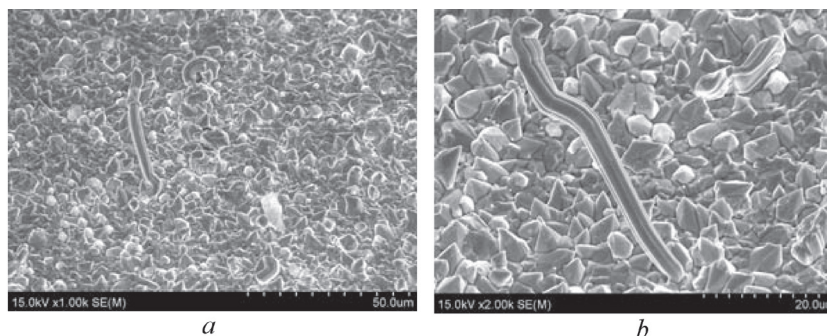


Рис. 8. Микрофотографии рельефа поверхности сплава Sn-Bi, полученного при электролизе реверсированным током, после 1 года хранения, $i_{cp} = 1,0 \text{ A/dm}^2$, $f = 1 \text{ Гц}$, $\gamma = 1,5$; $a - \times 1000$, $b - \times 2000$

Fig. 8. SEM images of Sn-Bi alloys, obtained at reversed current, after 1 year of storage, $i_{av} = 1.0 \text{ A/dm}^2$, $f = 1 \text{ Hz}$, $\gamma = 1.5$; $a - \times 1000$, $b - \times 2000$

Вместе с тем пористость снижает коррозионную стойкость покрытий. В таблице представлены значения скоростей саморастворения покрытий олово-висмут, полученных при различных режимах электролиза. Образцы выдерживались в агрессивной среде (раствор NaCl 30 г/л) в течение 96 ч.

Несмотря на высокое значение скорости саморастворения при отмеченном выше режиме осаждения ($i_{cp} = 2,0 \text{ A/dm}^2$, $\gamma = 1,5$, $f = 1 \text{ Гц}$) в сравнении с остальными режимами нестационарного электролиза, оно на 14 % ниже значения, полученного при использовании стационарного режима электролиза. При этом длина «усов» в покрытии, полученном на постоянном токе, существенно больше.

Коррозионная стойкость покрытий сплавом Sn-Bi, сформированных при различных режимах электролиза, $i_{cp} = 2,0 \text{ A/dm}^2$ **Corrosion resistance of Sn-Bi alloys formed under different electrolysis modes, $i_{av} = 2.0 \text{ A/dm}^2$**

Режим электролиза	Скорость саморастворения, г/м ² ·ч
Постоянный ток	0,0214
Импульсный ток: $f = 1 \text{ Гц}$, $q = 5$	0,0080
Импульсный ток: $f = 1000 \text{ Гц}$, $q = 5$	0,0053
Реверсированный ток: $f = 1 \text{ Гц}$, $\gamma = 1,5$	0,0187
Реверсированный ток: $f = 1000 \text{ Гц}$, $\gamma = 1,5$	0,0120

Заключение. На основании приведенных данных можно сделать вывод, что использование нестационарного электролиза позволяет эффективно воздействовать на структуру и образование «усов» олова на поверхности бессвинцовых покрытий под пайку без усложнения технологии изготовления элементов электронной техники. Наиболее медленный рост «усов» отмечен на реверсированном токе со средней плотностью $2,0 \text{ A/dm}^2$, частоте следования импульсов тока 1 Гц и коэффициенте заполнения $1,5$.

Список использованных источников

1. Гаврилов, С. А. Электрохимические процессы в технологии микро- и нанoeлектроники / С. А. Гаврилов, А. Н. Белов. – М.: Высш. образование, 2009. – 258 с.
2. Медведев, А. Форум по бессвинцовым технологиям пайки / А. Медведев, А. Новиков // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 4. – С. 48–54.
3. Лапина, Л. Н. Применение электролитических сплавов в технологии изготовления электронной техники / Л. Н. Лапина, Г. Е. Попова, Г. А. Трубачева // Обзоры по электронной технике. Сер. 6, Материалы. – М.: ЦНИИ «Электроника», 1980. – Вып. 6 (745). – С. 27–28.
4. Якобсен, К. «Усы» олова / К. Якобсен // Технологии в электронной промышленности. – 2008. – № 3. – С. 14–15.
5. The effect of electroplating parameters and substrate material on tin whisker formation / M. A. Ashworth [et al.] // Microelectronics Reliability. – 2015. – Vol. 55. – P. 180–191.
6. Mechanical deformation-induced Sn whiskers growth on electroplated films in the advanced flexible electronic packaging / Shih-Kang Lin [et al.] // J. Mater. Res. – 2007. – Vol. 7, iss. 22. – P. 1975–1986.
7. Winterstein, J. P. The influence of porosity on whisker growth in electroplated tin films / J. P. Winterstein, M. G. Norton // J. Mater. Res. – 2006. – Vol. 12, iss. 21. – P. 2971–2974.
8. Anocha, S. Matte tin (Sn) plating of semiconductor devices – whisker growth study / Anocha Sriyarunya, Dhiraj Bansal // IPC/JEDEC. 6th International Conference on Lead Free Electronic Components and Assemblies. – 2004. – P. 1–17.
9. NEMI tin whisker method standards / Irina Boguslavsky [et al.] // Proceedings of the SMTA International Conference, Chicago, Illinois, September 21–25, 2003. – 2003. – P. 3–10.
10. Ильин, В. А. Цинкование, кадмирование, оловянирование и свинцевание / В. А. Ильин. – Л.: Машиностроение, 1983. – 87 с.
11. Костин, Н. А. Импульсный электролиз / Н. А. Костин, В. С. Кублановский, А. В. Заблудовский. – Киев: Наук. думка, 1989. – 168 с.
12. Tin Whisker Projects [Electronic resource]. – Mode of access: http://inemi.org/webdownload/newsroom/Presentations/Amsterdam04_tin_whiskers.pdf. – Date of access: 01.02.2015.
13. Watanabe, T. Nano plating – microstructure formation theory of plated films and a database of plated films / T. Watanabe. – Oxford: Elsevier Science, 2004. – 714 p.
14. Ткаченко, Ф. К. О факторах, определяющих уровень энергии активации самодиффузии в металлах / Ф. К. Ткаченко, В. И. Мирошниченко, И. Ф. Ткаченко // Вестн. Приазов. гос. техн. ун-та. Сер.: Техн. науки. – 2011. – № 22. – С. 135–139.
15. Anal, A. K. Self-diffusion in a porous metal: the first empirical correlations for estimating pore-modified tracer self-diffusion parameters, D_0 and Q / A. K. Anal, G. S. Tendolkar // Acta. Metall. – 1986. – Vol. 34. – P. 1607–1615.
16. Xiao, G.-W. Effect of Cu stud microstructure and electroplating process on intermetallic compounds growth and reliability of flipchip solder bump / G.-W. Xiao // IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. – 2001. – Vol. 24, N 4. – P. 682–690.

References

1. Gavrilov S. A., Belov A. N. *Electrochemical processes in the technology of micro and nanoelectronics*. Moscow, Vysshee obrazovanie Publ., 2009. 258 p. (in Russian).
2. Medvedev A., Novikov A. Forum on lead-free soldering technology. *Technologii v elektronnoi promyshlennosti* [Technologies in Electronics Industry], 2007, no. 4, pp. 48–54 (in Russian).

3. Lapina L. N., Popova G. E., Trubacheva G. A. Application of electrolytic alloys in the technology of manufacturing of electronic equipment. *Obzory po elektronnoy tekhnike. Ser. 6, Materialy* [Electronics review. Series 6: Materials]. Moscow, Central Research Institute of Economics, Control Systems and Information “Electronics”, 1980, iss. 6 (745), pp. 27–28 (in Russian).
4. Jakobson K. “Mustache” of tin. *Tekhnologii v elektronnoi promyshlennosti* [Technologies in Electronics Industry], 2008, no. 3, pp. 14–15 (in Russian).
5. Ashworth M. A., Wilcox G. D., Higginson R. L., Heath R. J., Liu C., Mortimer R. J. The effect of electroplating parameters and substrate material on tin whisker formation. *Microelectronics Reliability*, 2015, vol. 55, iss. 1, pp. 180–191. Doi: 10.1016/j.microrel.2014.10.005
6. Shih-Kang Lin, Yuhi Yorikado, Junxiang Jiang, Keun-Soo Kim. Mechanical deformation-induced Sn whiskers growth on electroplated films in the advanced flexible electronic packaging. *Journal of Materials Research*, 2007, vol. 22, iss. 7, pp. 1975–1986. Doi: 10.1557/jmr.2007.0232
7. Winterstein J. P., Norton M. G. The influence of porosity on whisker growth in electroplated tin films. *Journal of Materials Research*, 2006, vol. 21, iss. 12, pp. 2971–2974. Doi: 10.1557/jmr.2006.0368
8. Anocha Sriyarunya, Dhiraj Bansal. Matte tin (Sn) plating of semiconductor devices – whisker growth study. *IPC/JEDEC 6th International Conference on Lead Free Electronic Components and Assemblies*, 2004, pp. 1–17.
9. Boguslavskii I., Bush P., Kam-Lum E., Kwoka M., McCullen J., Spalding K., Vo N., Williams M. NEMI tin whisker method standards. *Proceedings of the SMTA International Conference, Chicago, Illinois, September 21–25, 2003*, pp. 3–10.
10. Il'in V. A. *Zinc, cadmium, tin and lead-plating*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1983. 87 p. (in Russian).
11. Kostin N. A., Kublanovskii V. S., Zabludovskii A. V. *Pulsed Electrolysis*. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1989. 168 p. (in Russian).
12. *Tin Whisker Projects*. Available at: http://inemi.org/webdownload/newsroom/Presentations/Amsterdam04_tin_whiskers.pdf (accessed 01 February 2015).
13. Watanabe T. *Nano plating – microstructure formation theory of plated films and a database of plated films*. Oxford, Elsevier Science, 2004. 714 p.
14. Tkachenko F. K., Miroshnichenko V. I., Tkachenko I. F. On the factors that determine the level of activation energy of self-diffusion in metals. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo technicheskogo universiteta, Ser.: Texnicheskie nauki* [Bulletin of the Priazov State Technical University. Series: Engineering], 2011, no. 22, pp. 135–139 (in Russian).
15. Anal A. K., Tendolkar G. S. Self-diffusion in a porous metal: the first empirical correlations for estimating pore-modified tracer self-diffusion parameters, D0 and Q. *Acta Metallurgica*, 1986, no. 34, pp. 1607–1615. Doi: 10.1016/0001-6160(86)90107-0
16. Xiao G.-W., P.C.H. Chan, A. Teng, Jian Cai, M.M.F. Yuen Effect of Cu stud microstructure and electroplating process on intermetallic compounds growth and reliability of flip chip solder bump. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2001, vol. 24, no. 4, pp. 682–690.

Информация об авторах

Василец Виктория Константиновна – научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория «Функциональные пленочные системы», Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tbranz5@gmail.com

Хмыль Александр Александрович – доктор технических наук, профессор, научно-исследовательская лаборатория «Функциональные пленочные системы», Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: hmyl@bsuir.by

Кушнер Лариса Константиновна – старший научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория «Функциональные пленочные системы», Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kushner@bsuir.by

Кузьмар Инна Иосифовна – кандидат технических наук, научно-исследовательская лаборатория «Функциональные пленочные системы», Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: inna_kuzmar@list.ru

Information about the authors

Vasilets Viktoria Konstantinovna – Researcher, Research Laboratory “Functional electroplated systems”, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tbranz5@gmail.com

Khmyl Aleksandr Aleksandrovich – D. Sc. (Engineering), Research Laboratory “Functional electroplated systems”, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: hmyl@bsuir.by

Kushner Larisa Konstantinovna – Senior Researcher, Research Laboratory “Functional electroplated systems”, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kushner@bsuir.by

Kuzmar Inna Iosifovna – Ph. D. (Engineering), Research Laboratory “Functional electroplated systems”, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: inna_kuzmar@list.ru

Для цитирования

Влияние режима электролиза на образование «усов» в покрытиях на основе олова / В. К. Василец [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2017. – № 2. – С. 30–39.

For citation

Vasilets V. K., Khmyl A. A., Kushner L. K., Kuzmar I. I. The effect of electroplating parameters on tin “whiskers” formation. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2017, no. 2, pp. 30–39 (in Russian).