

Исследование микросварных соединений алюминиевой проволоки с алюминиевым гальваническим покрытием корпусов полупроводниковых изделий

Известно, что алюминиевое гальваническое покрытие хорошо смачивается припоями типа Al-Zn и Al-Ge, что можно использовать в технологии пайки полупроводниковых кристаллов на основания корпусов полупроводниковых изделий (ППИ). Кроме того, данное покрытие хорошо сваривается с алюминиевой проволокой как термокомпрессионным, так и ультразвуковым методами сварки. К сожалению, данной контактной паре не уделяется серьезного внимания со стороны разработчиков и производителей ППИ. Это связано с особенностями технологического процесса гальванического алюминирования. В статье установлено, что качество контактов зависит от структуры и толщины покрытий.

Виктор Зенин,
д. т. н., профессор ВГТУ

zenvik@bk.ru

Александр Колычев,
к. т. н.
Борис Спиридонов,
к. х. н.
Ольга Хишко

Качество микросварных соединений алюминиевой проволоки в корпусах ППИ с золотым покрытием, а также с покрытиями из никеля и его сплавов рассмотрены в работах [1, 2]. Достаточно подробно проведены исследования по влиянию состава алюминиевой металлизации контактных площадок кристаллов ППИ на качество микросварных соединений алюминий-алюминий [3].

Следует отметить, что контактной паре алюминиевой проволоки с алюминиевым гальванопокрытием не уделяется достаточного внимания в технологическом процессе производства ППИ.

Настоящая работа посвящена оптимизации режимов гальванического алюминирования корпусов ППИ, оценке свариваемости термокомпрессионной (ТКС) алюминиевой проволоки с алюминиевым покрытием и исследованию коррозионной стойкости микросварных соединений алюминий-алюминий.

Влияние свойств покрытий на качество микросварных соединений

Здесь рассмотрено влияние структуры и толщины алюминиевого покрытия на свариваемость с алюминиевой микропроволокой при ТКС. Для изготовления образцов были взяты кристаллодержатели из сплава ферроникель 42Н, на которые наносились пленки алюминия из электролита, содержащего бромид алюминия — 500 г/л, парафин — 5 г/л, ксилол — остальное. Электролиз проводился в герметизированном электролизере в атмосфере азота. В качестве анодов использовались пластины алюминия марки А99,99. Режимы электролиза:

- катодная плотность тока $i_k = 0,5-5$ А/дм²;
- продолжительность электролиза $\tau = 15-30$ мин.

На данных режимах подготовлено две партии образцов: 1 — для исследования влияния свойств покрытий на качество соединений; 2 — для оценки коррозионной стойкости соединений. В каждой партии образцов было по 10 групп.

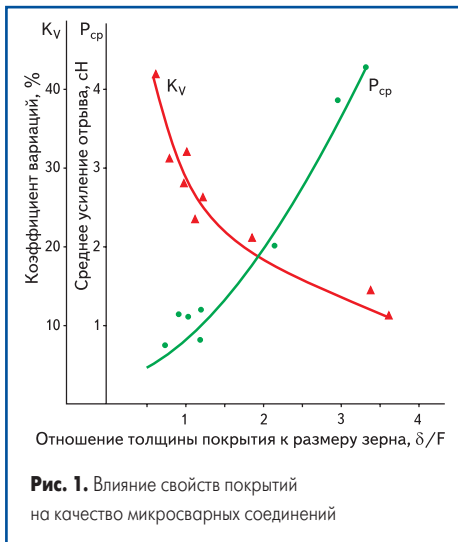
После контроля морфологии поверхности на растерном электронном микроскопе проводилась имитация напайки кристаллов на основания корпусов ППИ: нагрев образцов до 450 °С и выдержка в течение двух минут.

Формирование микросварных соединений алюминиевой проволоки с алюминиевым покрытием осуществлялось на установке ТКС типа НПВ-1А. Проволока марки АК09ПМ30 диаметром 0,03 мм в исходном состоянии имела предел прочности $\sigma_b = 200-220$ МПа и относительное удлинение $\gamma = 3-4\%$. Для ТКС использовали следующие режимы: температура нагрева кристаллодержателя 350 ± 10 °С, давление сварочного инструмента на проволоку $2,0 \pm 0,1$ Н, время приложения давления при сварке $0,4 \pm 0,05$ с. Для сварки использовались режимы, рекомендуемые для пары алюминий-алюминий.

Для каждой группы образцов, полученных при определенном режиме электролиза, было сформировано по 100 сварных соединений.

Известно, что важнейшей характеристикой надежности микросоединений ППИ является стабильность прочности (усилие разрушения). Поэтому оценка свариваемости осуществлялась по среднему значению разрушающего усилия (P_{cp}) и коэффициенту вариации (K_v), характеризующему воспроизводимость качества микросоединений.

Контроль прочности соединений проводился разрушающим методом — натяжением проволочного



вывода под углом 90° к плоскости сварного соединения. Характер разрушения анализировался под микроскопом типа ММУ-3 при увеличении $80\times$. При этом наблюдались два вида разрушений: обрыв по утоньшению проволоки в зоне сварки и частичное или полное отслаивание проволоки от покрытия. Соединения считались качественными, если при оценке прочности разрушающим методом обрывы проволоки происходили по «шейке» (участке перехода сварного соединения в проволоку).

По результатам измерений для каждой партии образцов были определены $P_{ср}$ и K_v . Коэффициент вариации определялся по известной формуле

$$K_v = \sigma/P_{ср} \times 100\%,$$

где σ — среднее квадратичное отклонение усилений отрыва, сН.

Контроль структуры и толщины алюминиевых пленок показал, что величина зерна и толщина пленки определяются режимами электролиза — катодной плотностью тока и продолжительностью процесса. Пленки толщиной до 2 мкм, полученные при значениях $i_k = 0,5 \text{ A/дм}^2$ и $\tau = 15\text{--}30$ мин, имеют мелкозернистую структуру, но большое количество пор. С увеличением i_k свыше 2 A/дм^2 размер зерна увеличивается и на поверхности появляются дендриты, количество которых возрастает в местах с повышенной плотностью тока.

На кристаллодержателях, имеющих покрытие толщиной до 2 мкм, наблюдается локальное отслоение покрытия после проведения термообработки, имитирующей напайку кристаллов, что связано с окислением ферроникеля кристаллодержателей через поры в алюминиевом покрытии.

Полученные данные по качеству сварных соединений были обработаны с помощью методов математической статистики и сведены в 10 групп (табл. 1). На рис. 1 представлена зависимость качества сварных соединений от свойств покрытий.

Из рис. 1 и таблицы 1 видно, что свариваемость алюминиевого покрытия, нанесенного на подложку из ферроникеля, зависит

Таблица 1. Оценка свариваемости алюминиевых покрытий

Номер группы	Плотность тока, А/дм ²	Время электролиза τ , мин	Толщина δ , мкм	Размер зерна F , мкм	$P_{ср}$, сН	K_v , %	Разрушение в виде отслоения проволоки от покрытия, %
1	0,5	15	1	1–2	0,4	42	20
2	0,5	30	2	1–2	0,7	34	17
3	1,0	15	2	1–2	1,4	26	5
4	1,0	30	5	1–2	4,3	12	Отслоений нет
5	2,0	15	3	2–3	1,4	22	3
6	2,0	30	7	2–3	3,8	15	Отслоений нет
7	3,0	15	4	4–5	1,2	32	10
8	3,0	30	10	4–5	1,9	27	8
9	5,0	15	6	5–7	1,1	37	28
10	5,0	30	14	5–7	0,7	40	35

от структуры и толщины алюминиевой пленки. Максимальную прочность имеют сварные соединения алюминиевой микропроволоки с мелкозернистыми покрытиями толщиной 5–7 мкм, полученными при режиме электроосаждения: $i_k = 1\text{--}2 \text{ A/дм}^2$, $\tau = 30$ мин. Низкая прочность и высокий процент ($\sim 20\%$) разрушений в виде отслоения проволоки от покрытий меньших толщин связаны с загрязнениями поверхности покрытия оксидами железа и никеля, выходящими при нагревании через поры в покрытии, что приводит к уменьшению площади взаимодействия проволоки с покрытием при сварке.

Сварные соединения с пленками, полученными при значениях $i_k > 2 \text{ A/дм}^2$, имеют более низкую прочность и большой разброс параметров.

При контроле качества соединений с покрытиями, полученными при $i_k > 3 \text{ A/дм}^2$, наблюдалось до 10% разрушений в виде отслоения проволоки от покрытия, а при $i_k = 5 \text{ A/дм}^2$ число отслоений составило $\sim 35\%$. Это связано с крупнозернистой и дендритной структурой поверхности алюминиевого покрытия (рис. 2б), которая ухудшает условия вытеснения адсорбированных и оксидных пленок из зоны соединения при пластической деформации в процессе сварки, что приводит к уменьшению площади взаимодействия свариваемых металлов.

Таким образом, свариваемость алюминиевых покрытий, нанесенных гальваническим осаждением, зависит от их структуры и толщины. Оптимальные результаты для исследуемого электролита получены на покрытиях толщиной 5–7 мкм, величина зерна при этом не превышала 3 мкм и на поверхности отсутствовали дендриты.

Коррозионная стойкость микросварных соединений Al-Al

Коррозионная стойкость металлов и сплавов зависит от химического состава элементов сплава, внутренней структуры, а также чистоты поверхности деталей. Существует большое количество способов определения скорости коррозии токопроводящих материа-

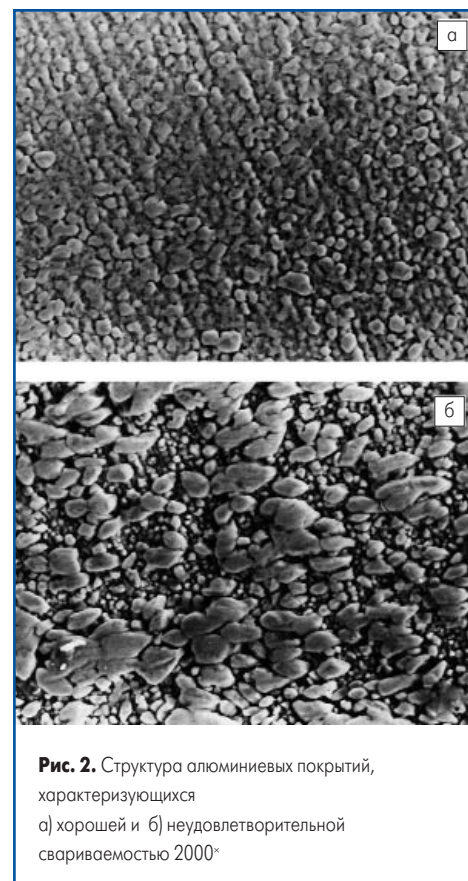


Рис. 2. Структура алюминиевых покрытий, характеризующихся а) хорошей и б) неудовлетворительной свариваемостью $2000\times$

лов. В одном случае исследуемые образцы помещают в агрессивную среду, выдерживают заданное время и по коррозионным поражениям поверхности образца судят о степени коррозии материала. В другом — через образцы, размещенные параллельно друг другу, пропускают ток звуковой или ультразвуковой частоты, измеряют сопротивление образцов и по нему определяют скорость коррозии. Коррозионную стойкость металлов, особенно микронных размеров, оценивают также изменением внутреннего трения образца, измеряемого до и после коррозионных испытаний.

Для оценки времени разрушения контактной пары (обрыв проволоки в зоне сварного контакта) обычно определяют величины коррозионных токов. Значение этих токов можно получить либо на основе

Таблица 2. Влияние режимов электроосаждения алюминия на коррозионную стойкость ($\tau_{\text{ср}}$) сварного контакта Al-Al в КПА

Номер группы	Плотность тока, А/дм ²	Время электролиза τ , мин	$\tau_{\text{ср}}$, ч
1	0,5	15	19
2	0,5	30	24
3	1,0	15	32
4	1,0	30	57
5	2,0	15	36
6	2,0	30	63
7	3,0	15	33
8	3,0	30	54
9	5,0	15	26
10	5,0	30	23

анализа поляризационных измерений, проводимого отдельно на каждом из металлов пары с последующей графической обработкой результатов, либо при измерениях на короткозамкнутых образцах того и другого металла, моделирующих работу контактной пары [4]. Обычно используются оба метода для определения величины коррозионного тока.

В сравнении с контактной парой Al-Au контакт алюминиевой проволоки с алюминиевым гальванопокрытием должен быть предпочтительнее с точки зрения коррозионной устойчивости, поскольку в паре Al-Al отсутствует разность потенциалов.

Из данных таблицы 2 следует, что время, в течение которого наблюдается полное разрушение контакта Al-Al в среде КПА, составляет от 19 до 63 ч. Это свидетельствует о более высокой коррозионной стойкости контакта Al-Al, чем контакта Al-Au, для которого это время составляет максимально 50 мин (среднее время 20 мин). Следует отметить, что повысить коррозионную стойкость контактов Al-Au в 2–3 раза возможно при обработке их парами ингибиторов [5].

Сопоставление данных по свариваемости алюминиевой проволоки с гальваническим алюминиевым покрытием (табл. 1), с данными коррозионных испытаний контактов Al-Al показывает, что сварные контакты, имеющие максимальную прочность, имеют и наибольшую коррозионную устойчивость ($\tau_{\text{ср}} = 57–63$ ч). Это, по-видимому, связано со структурой сварного шва, который у сварных контактов с высокой прочностью имеет значительно меньшее количество пор и пустот в сравнении с контактами, имеющими низкую прочность. Известно, что прочность сварных соединений зависит

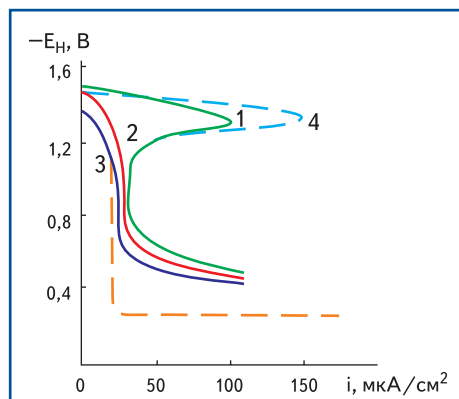


Рис 3. Потенциодинамические кривые электролитического алюминия (на меди), полученного из кислого электролита при $i_k = 1$ А/дм² и $\tau_{\text{эл}} = 30$ мин. Коррозионная среда — КПА:

- 1 — без ингибитора;
- 2 — 0,001М мета-нитро-бензоат-гексаметиленимина;
- 3 — 0,001М 3,5-динитро-бензоат-гексаметиленимина;
- 4 — алюминий марки А99,99

от площади взаимодействия материалов в сварном соединении, которая увеличивается при отсутствии в контакте адсорбированных загрязнений и оксидных пленок, а также при увеличении класса чистоты поверхности пленок.

Известно, чтобы повысить коррозионную стойкость микросоединений проволока-пленочная металлизация в ППИ контакты подвергают обработке ингибиторами коррозии [4, 6].

При обработке парами ингибиторов метанитро-бензоат-гексаметиленимином (МНБГМИ) и 3,5-динитро-бензоат-гексаметиленимином (ДНБГМИ) контактов Al-Al существенно изменяется характер потенциодинамических поляризационных кривых. Из рис. 3 видно, что как для металлургического алюминия, так и для алюминия, не обработанного ингибиторами, кривая имеет все характерные участки для пассивного металла: активную, активно-пассивную и транспассивную области.

При введении в коррозионную среду МНБГМИ исчезают области активного и активно-пассивного состояния, а токи полной пассивации становятся меньше. Влияние ингибиторов на коррозионную стойкость алюминиевого покрытия обусловлено адсорбцией ингибиторов на поверхности алюминия и ее последующей пассивации, возрастающей при увеличении их содержания. Защитные свойства ингибиторов были проверены на сварных контактах Al-Al, которые обрабатывали парами в эксикаторах. Было установлено, что

обработка ингибиторами сварных контактов существенно повышает их коррозионную стойкость. Например, при обработке парами МНБГМИ (в течение суток) среднее время, необходимое для их разрушения в КПА, возрастает до 80 ч, аналогичная обработка ДНБГМИ увеличивает это время до 85 ч.

Таким образом, проведенные исследования показали, что в технологии производства ППИ в качестве технологических покрытий корпусов возможно использование гальванического алюминирования. Естественно, при оценке надежности данных контактов необходимо проведение дополнительных исследований при повышенных температурах, термоциклировании, под токовой нагрузкой, т. е. в режиме эксплуатации конкретных типов ППИ.

Литература

1. Зенин В. В., Бокарев Д. И., Сегал Ю. Е. Исследование микросварных соединений алюминиевой проволоки с золотым гальваническим покрытием корпусов изделий электронной техники // Изв. вузов. Электроника. 1999. № 5. С. 67–74.
2. Зенин В. В., Сегал Ю. Е., Кольчев А. И. Исследование качества микросварных соединений алюминиевой проволоки в корпусах изделий электронной техники с покрытиями из никеля и его сплавов // Изв. вузов. Электроника. 2000. № 2. С. 37–44.
3. Горлов М. И., Зенин В. В., Кольчев А. И. Исследование влияния состава алюминиевой металлизации на качество микросварных соединений алюминий-алюминий // Изв. вузов. Электроника. 1998. № 6. С. 67–72.
4. Коррозионная стойкость контактных пар алюминий-золото и золото-ковар / Ю. М. Водянов, В. В. Зенин, В. Н. Осенков, В. К. Алтухов // Электронная техника. Сер. 7. Технология, организация производства и оборудование. 1985. Вып. 3. С. 23–25.
5. Зенин В. В., Бокарев Д. И., Спиридонов Б. А., Сегал Ю. Е., Кольчев А. И. Способ защиты от коррозии микросварных контактов алюминий-золото. Патент РФ на изобретение № 2166000. Заявл. 11.06.1999. Опубл. 27.04.2001. Бюл. № 12
6. Коррозионная стойкость сварного контакта алюминиевой проволоки и гальванического алюминия / Л. И. Бобрятшов, А. И. Кольчев, Б. А. Спиридонов, А. И. Фаличева // Электронная техника. Сер. 7. Технология, организация производства и оборудование. 1987. Вып. 3. С. 15–18.