ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ В ЗОНЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ ПРОВОЛОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В СВЧ ТРАНЗИСТОРАХ

© Д. Г. Алипа, О. Ю. Дьяконица, А. О. Климов

АО «НПП «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной пр., 27

В статье проанализированы факторы, влияющие на качество монтажа золотых проволок на металлизированные контактные площадки плат согласования мощных СВЧ транзисторов. Показано, что наличие воздушных полостей в паяном соединении и их размеры оказывают влияние как на формирование сварочных соединений, так и на электрические характеристики СВЧ транзисторов.

Ключевые слова: ультразвуковая сварка, деформация, импеданс, внутрисогласованный транзистор, резонанс, рентгеновская дефектоскопия

Сведения об авторах: Алипа Денис Геннадьевич, alipa_dg@pulsarnpp.ru; Дьяконица Олег Юрьевич, аспирант, djakonica_oj@pulsarnpp.ru; Климов Алексей Олегович, аспирант, klimov_ao@pulsarnpp.ru

INVESTIGATION OF THE DEFECTS IN ULTRASONIC BONDING OF MICROWAVE TRANSISTORS

D. G. Alipa, O. Yu. Dyakonitsa, A. O. Klimov

JSC «S&PE «Pulsar», 105187, Moscow, Okruzhnoy proezd, 27

Quality factors of golden wire bonding to metalized contact pads of microwave transistor matching circuits are analyzed in the article. It is shown that the presence and the size of air cavities in welded bond influence both the formation of welding joints and the electric parameters of microwave transistors.

Keywords: ultrasonic bonding, deformation, impedance, internally matched transistor, resonance, X-ray defect detection

Data of authors: Alipa Denis Gennadievich, alipa_dg@pulsarnpp.ru; Dyakonitsa Oleg Yurievich, postgraduate, djakonica_oj@pulsarnpp.ru; Klimov Aleksey Olegovich, postgraduate, klimov_ao@pulsarnpp.ru

Введение

Проблемы наличия пустот в паяных соединениях до сих пор остаются актуальными для полупроводниковой СВЧ электроники, в частности для сборок гибридных интегральных микросхем, мощных СВЧ транзисторов и др. В [1] показано, как наличие воздушных полостей влияет на электрические и надёжностные характеристики полупроводниковых изделий.

Изучение размеров пустот, их состава, характера расположения в объёме паяного соединения представляет боль-

шой интерес с точки зрения обеспечения общей надёжности сборки, стабильности электрических и тепловых параметров, соответственно, безотказности работы приборов. В [2-4] представлены результаты, подтверждающие, что обеспечение тепловых режимов работы особенно важно при проектировании и последующей эксплуатации СВЧ усилителей мощности.

Следующим после пайки и приклейки элементов СВЧ схем или внутрисогласованных транзисторов (ВСТ) критичным этапом сборки является монтаж проволоч-

ных соединений. Даже в серийном производстве от сборки к сборке прочность и повторяемость проволочных соединений может изменяться, что объясняется неудовлетворительным качеством сварки: пережимы сварного пятна, характеризующимися малым сечением изгиба («шейки») проволоки; несоответствием длин, высот и ориентации в пространстве перемычек, что значительно меняет их взаимную индуктивность. Это может привести к потерям высокочастотного сигнала и отклонению режимов работы прибора от рассчитанных, а в долгосрочной перспективе к отрыву проволок и, возможно, отказу всего изделия.

В статье проанализированы факторы, влияющие на качество монтажа золотых проволок на металлизированные контактные площадки плат согласования мощных СВЧ транзисторов. Диаметр проволоки – 25 микрон. Приварка и снятие характеристик тока ультразвукового преобразователя и деформации проволок проводились на автомате ультразвуковой сварки Orthodyne Electronics 3700.

Анализ профилей формирования сварки

Качество металлизации контактных площадок критично для «свариваемости» проволок, поэтому перед началом монтажа пе-

ремычек в приборе рекомендуется провести визуальный контроль контактных площадок.

Важно контролировать качество нанесения слоя никеля (2-3 мкм), так как барьерный слой препятствует диффузии атомов меди через тонкий слой золота (1-3 мкм) и формированию оксидного слоя. Если сделать приварку с очень большой мощностью ультразвука, то через истёртый слой золота может проникать кислород [5]. Нарушение технологии осаждения металлизации может сильно ослабить прочность сварки и в конечном счёте привести к деградации контакта.

Следует отметить, что под слоем золотой металлизации могут находиться углеводородные включения. Такие дефекты значительно уменьшают прочность сварного контакта. Поэтому соблюдение чистоты рабочих помещений и оборудования ни в коем случае нельзя игнорировать. Чтобы избежать проблем со свариваемостью изделий, рекомендуется производить монтаж проволок сразу после плазменной очистки изделий. На данный момент не существует определённой методологии идентификации загрязнений в «реальном времени», поэтому проблема наличия примесей в процессе сборки остаётся актуальной.

На рис. 1 показана поверхность металлизации медь-никель-золото. Как видно по поверхности сосредоточено большое

Рис. 1

Поверхность металлизации платы согласования содержит дефекты типа «вздутие»

Рис. 2

**Профиль деформации проволоки в течение времени на металлизации,
загрязнённой органическими остатками**

количество «вздутых» дефектов (выделены красным цветом). Они могут появиться как при осаждении слоёв металлов, так и при пайке плат на основание прибора. Если данные дефекты появляются после выдержки при температуре пайки более 300 °С, это говорит о плохом качестве металлизации и соответственно плохой свариваемости площадок [5]. Часто возникновение дефектов обусловлено наличием остатков органических материалов [6].

На рис. 2 показан профиль деформации проволоки в течение времени сварки на металлизации, загрязнённой органикой. На профиле периодически прослеживаются участки с неменяющейся деформацией (выделены красным цветом). Пологие участки можно объяснить тем, что во время «скольжения» инструмента по органике почти не происходит поглощения ультразвуковых колебаний (осцилляций) из-за отсутствия притирки между инструментом и золотой поверхностью. Из анализа профиля деформации можно сделать вывод, что органика находилась как на поверхности золота, так и в глубине слоя.

В данном случае и далее будем отталкиваться от ранее настроенных параметров системы (усилие прижима, мощность ультразвука, время приложения ультразвука), при которых, по статистике, получаются самые прочные и стабильные сварные соединения.

Сама технология приварки на современном автоматическом оборудовании состоит в следующем. За очень короткий интервал времени устанавливается механический контакт между двумя свариваемыми поверхностями (проволока и контактная площадка). Затем для демпфирования колебаний динамической системы (инструмент – подложка), вызванных быстрым прижимом проволоки под начальным давлением, программируется задержка подачи ультразвуковых вибраций (pre-bond delay) в течение примерно 3 мс, что соответствует примерно 350-400 осцилляций при частоте резонанса ультразвуковой системы 120 кГц [7].

Уже при первом касании инструментом проволоки, примерно через 1 мс, включается ультразвуковой генератор (рис. 3), подающий напряжение на пьезоэлектрический преобразователь, которое быстро растёт в

Рис. 3

Упрощённая электрическая схема ультразвуковой системы: $R_{\text{преобразователя}} = R_{\text{без нагрузки}} + R_{\text{с нагрузкой}}$; $R_{\text{без нагрузки}}$ обычно составляет 30 Ом; $R_{\text{с нагрузкой}}$ в воздухе равно 0; $R_{\text{преобразователя}}$ во время сварки увеличивается до 300 Ом (зависит от развариваемого прибора и ультразвуковой мощности)

течение 2 мс; электрические колебания преобразуются в механические: на частоте резонанса преобразователя вибрация инструмента максимальна. Далее при приложении сварочного усилия вибрирующий инструмент начинает деформировать проволоку, нагрузка и импеданс системы увеличиваются, осцилляция инструмента падает. Система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) мгновенно реагирует на изменение в динамической системе и отслеживает частоту резонанса, так как малейшее отклонение

приводит к значительному уменьшению выходной мощности преобразователя (рис. 4).

Рассмотрим профили сварных соединений на платах согласования СВЧ ВСТ (рис. 5). Как видно из графика зависимости тока преобразователя от времени для хорошей сварки, просадка по току минимальна, система мгновенно реагирует на изменение импеданса. Чем больше мощность ультразвука, тем больше начальная просадка по току. Как правило, профиль первой сварки отличается от последующих,

Рис. 4

Рабочий режим ультразвуковой системы

Рис. 5

**Профили изменения тока преобразователя и деформации проволок
для плотной динамической системы «инструмент-плата-припой-корпус»**

далее система перестраивается. Деформация во всём цикле сварки для каждой переключки примерно одинаковая ± 1 мкм.

Неодинаково прорисованные профили сварок можно объяснить, во-первых, тем, что морфология металлизации меняется, корпус прибора не идеально ровный (не идеально плотный контакт с термостолком) и характер изменения импеданса для каждой проволоки немного различается, во-вторых, генераторный усилитель не совсем «идеален», во время работы существует незначительная утечка по напряжению.

Рентгеновская дефектоскопия исследуемого прибора показала, что число пустот под платами составляет не более 20 % от общей площади (рис. 6).

На рис. 7 представлен рентгеновский снимок прибора с суммарной площадью пустот под платами более 50 %. Красным цветом выделены области с наибольшей концентрацией пустот.

Проанализируем профили сварных соединений плат согласования ВСТ (рис. 8) с большой площадью пустот как представлено на рис. 7. Затухающие синусоидальные колебания тока преобразователя можно объяснить тем, что при запрограммированном времени начального прижима, после прижима инструментом проволоки, полное демпфирование вибраций динамической системы происходит только к самому концу цикла сварки. Можно сделать вывод, что чем больше размеры пустот под платами, тем дольше время затухания вибраций. Области с отрицательной деформацией можно объяснить тем, что во время собственных упругих колебаний подложки инструмент каждые 3 мс не нагружается (можно считать, что он находится в воздухе), соответственно, система «думает», что деформация проволоки закончена и импеданс падает до стандартных 30 Ом, ток растёт до максимума.

Рис. 6

Контрастный рентгеновский снимок паяного слоя рабочего транзистора

Статистика сварки плат согласования показывает, что самые нестабильные соединения наблюдаются в крайних областях. Это можно объяснить крайне высокой плотностью пустот. Из опытов по характеру изменения тока преобразователя можно предположить, что большая амплитуда гармонических колебаний системы наблюдается при газовых пустотах, а меньшая амплитуда гармонических колебаний – при пустотах, состоящих из остатков флюса. Предположительно, флюсовые пустоты обеспечивают менее динамический характер вибраций подложки благодаря большей плотности системы и, соответственно, быстрого демпфирования вибраций [8]. По-

следующие испытания ВСТ, паянный слой которого представлен на рис. 7, показали, что его СВЧ параметры «катастрофически» не соответствуют расчётным, более того – их невозможно скорректировать. Таким образом получился «ненастраиваемый» транзистор, что было обусловлено нарушениями в технологии сборки.

Большое количество пустот можно объяснить неотлаженностью профиля пайки в вакуумной печи оплавления, проблемами с загрязнённостью паяемых поверхностей, неотработанностью технологического маршрута монтажа элементов ВСТ. Так как профили тока преобразователя и деформации проволок различаются,

Рис. 7

Контрастный рентгеновский снимок паяного слоя «ненастраиваемого» транзистора

Рис. 8

**Профили изменения тока преобразователя и деформации проволок
для неплотной динамической системы «инструмент-плата-припой-корпус»**

это влияет на сам внешний вид петель и их повторяемость (рис. 9). Неидентичность проволок по взаимному расположению, непараллельность, разность профилей высот петель – всё это может приводить к долгой настройке согласующей платы на нужный импеданс. Поэтому алгоритмы настройки для разных приборов одной серии различаются. При работе СВЧ приборов на высоких частотах индуктивность проводников должна быть минимальной. Формы сварных петель существенно влияют на потери СВЧ сигнала [9]. Если параллельность проволок плохо соблюдена, то рассчитанные значения амплитудно-частотных характеристик прибора могут значительно отличаться от реальных. Следовательно, для оптимальной работы приборов такие параметры как длина и высота проволок, расстояние между ними не должны меняться от прибора к прибору.

Таким образом, дальнейшее продолжение работ должно быть направлено на количественные оценки допустимых размеров дефектов паяных и сварных соединений по отношению к достижению СВЧ характеристик, коэффициента полезного действия и увеличению времени наработки на отказ полупроводниковых приборов.

Выводы

В статье представлены внешние и внутренние факторы, влияющие на свариваемость металлических изделий.

Показано, что наличие пустот в паяном соединении платы и корпуса оказывает существенное влияние на профили изменения тока ультразвукового преобразователя и деформации проволок.

Показано, что анализ паяных слоёв и сварочных соединений может стать ме-

Рис. 9

Внешний вид платы согласования с непарallelностью петель сварных проволок

тодом априорного определения работоспособности СВЧ интегральных схем.

Литература

1. Борисов О. В., Герасимов А. О., Колковский Ю. В., Курмачев В. А., Миннебаев В. М., Редька Ал. В., Синкевич В. Ф., Таран П. В. 500-Ваттный GaN усилитель мощности: оптимизация энергетических и надёжностных характеристик // Материалы XI научно-технической конференции «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА», РФ, г. Дубна, 17-19 октября 2012, с. 13-17.
2. Аболдуев И. М., Гарбер Г. З., Зубков А. М., Иванов К. А., Колковский Ю. В., Красильников В. Д., Миннебаев В. М. Температурная зависимость параметров СВЧ мощных полевых транзисторов на основе нитрида галлия и алмаза // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2015. – № 1 (235). – С. 18-25.
3. Борисов О. В., Иванов К. А., Колковский Ю. В., Миннебаев В. М., Редька Ал. В., Ушаков А. В. Фазостабильный 200-ваттный GaN усилитель мощности X-диапазона // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2013. – № 1 (230). – С. 31-36.
4. Груздов В. В., Колковский Ю. В., Миннебаев В. М. Электронные блоки на основе AlGaIn/GaN/SiC СВЧ-гетеротранзисторов для космических систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 12 (часть 2). – С. 201-208.

5. Shankara K. Prasad. Advanced Wirebond Interconnection Technology // INKROMA Bangalore, India, 2004, pp. 249-250.
6. Zero Defect Production – Series Overview Part V: Impedance Check for Wire-Bonding EPP Europe 05/06 2006, pp. 48-49.
7. Masakatsu Maeda, Yasuhiro Yoneshima, Hideki Kitamura, Keita Yamane and Yasuo Takahashi Deformation Behavior of Thick Aluminum Wire during Ultrasonic Bonding // Materials Transactions, 2013, vol. 54, no. 6, pp. 916-921.
8. Goran Matijasevic and Chin C. Lee. Void-Free Au-Sn Eutectic Bonding of GaAs Dice and its Characterization Using Scanning Acoustic Microscopy // Journal of Electronic Materials, 1989, vol. 18, no. 2, pp.1-3.
9. Characterization and modeling of bond wires for high-frequency applications By: Dean Nicholson and HeeSoo Lee Agilent Technologies. – Режим доступа: www.agilent.com (дата обращения: 13.04.17).

References

1. Borisov O. V., Gerasimov A. O., Kolkovsky Yu. V., Kurmachev V. A., Minnebaev V. M., Redka Al. V., Sinkevich V. F., Taran P. V. 500-W GaN power amplifier: optimization of energy and reliability characteristics. *Materialy XI nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Tverdotelnaya elektronika. Slozhnye funktsionalnye bloki REA»* [Proceedings of XI scientific and technical conference «Solid-state electronics. Complex functional blocks of radioelectronic equipment»]. Russia, Dubna, 17-19 October, 2012, pp.13-17.

2. Abolduev I. M., Garber G. Z., Zubkov A. M., Ivanov K. A., Kolkovsky Yu. V., Krasilnikov V. D., Minnebaev V. M. The microwave parameters temperature dependence of the GaN and diamond power FETs. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2015, № 1 (235), pp. 18-25.
3. Borisov O. V., Ivanov K. A., Kolkovsky Yu. V., Minnebaev V. M., Redka A. V., Ushakov A. V. Phasestable 200-W X-band GaN power amplifier. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2013, № 1 (230), pp. 31-36.
4. Gruzlov V. V., Kolkovsky Yu. V., Minnebaev V. M. Microwave AlGaIn/GaN/SiC HFET based electronic blocks for space applications. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Engineering Science], 2016, № 12 (part 2), pp. 201-208.
5. Shankara K. Prasad. Advanced Wirebond Interconnection Technology // INKROMA Bangalore, India, 2004, pp. 249-250.
6. Zero Defect Production – Series Overview Part V: Impedance Check for Wire-Bonding EPP Europe 05/06 2006, pp. 48-49.
7. Masakatsu Maeda, Yasuhiro Yoneshima, Hideki Kitamura, Keita Yamane and Yasuo Takahashi Deformation Behavior of Thick Aluminum Wire during Ultrasonic Bonding // *Materials Transactions*, 2013, vol. 54, no. 6, pp. 916-921.
8. Goran Matijasevic and Chin C. Lee. Void-Free Au-Sn Eutectic Bonding of GaAs Dice and its Characterization Using Scanning Acoustic Microscopy // *Journal of Electronic Materials*, 1989, vol. 18, no. 2, pp.1-3.
9. Characterization and modeling of bond wires for high-frequency applications By: Dean Nicholson and HeeSoo Lee Agilent Technologies. – URL: www.agilent.com (accessed: 13 April 2017).