УДК 621.3.049.776.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМОЗВУКОВОЙ СВАРКИ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ НА ПОДЛОЖКАХ ENEPIG СВЧ ПРИБОРОВ

Петухов И.Б.

ОАО «Планар-СО», Минск, Республика Беларусь, igorpetuchov@mail.ru

Аннотация: разработана математическая модель кинетики диффузии при термозвуковой сварке золотой проволоки диаметром 17,5 мкм на подложку Rogers 6035HTC с покрытием ENEPIG, доказывающая высокую барьерную эффективность 100 нм палладиевого слоя при монтаже межсоединений золотой проволокой термозвуковой сваркой методом «шарик-клин» при температуре 180-200℃. Моделирование в Matlab показало, что ультразвуковая интенсификация обеспечивает формирование прочного соединения.

Ключевые слова: проволочные межсоединения, покрытие ENEPIG, термозвуковая сварка, подложка СВЧ усилителя.

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании изделий СВЧ, в частности усилителей с выходной мощностью до 20 Вт и частотой в диапазоне от 10 до 12 ГГц, требуется учитывать следующие специфические требования:

- выбор подложки для монтажа кристалла усилителя и SMD компонентов;

- выбор метода монтажа компонентов и межсоединений;

- плотный монтаж проволочных межсоединений с контактных площадок кристалла цепей питания;

- тип металлизации зон присоединения проволочного монтажа.

Из многообразия выпускаемых высокочастотных диэлектрических подложек выделяется высокочастотный ламинат на основе фторопласта с керамическим наполнителем Rogers RT 6035HTC для работы в условиях высокой мощности и высоких радиочастот. Материал обладает высокой теплопроводностью 1,44 Вт/м*К, диэлектрической проницаемостью 3,5±0,05 на частоте 10 ГГц и низким углом диэлектрических потерь 0,0013 на частоте 10 ГГц, что гарантирует минимальное затухание сигнала [1]. Благодаря высокой теплопроводности материал быстро рассеивает тепло от греющихся компонентов, например, от GaN кристалла усилителя, смонтированного на припойную пасту подложки.

Технические характеристики подложки Rogers RT 6035HTC позволяют кратковременное тепловое воздействие на материал до 288℃ в течение 20- 60 секунд без ухудшения прочности сцепления медной фольги с подложкой. Температурный диапазон 180-200 ℃ является для подложки безопасным, что позволяет использовать термозвуковую сварку золотой проволоки методом «шарик-клин» [2].

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СБОРКИ

Подложка Rogers RT 6035HTC должна иметь финишное металлическое покрытие, совместимое с монтажом компонентов и обеспечением качественного соединения золотой проволоки. Стандартное покрытие ENIG (иммерсионное золото по подслою никеля) подходит, но толщина слоя золота должна строго контролироваться. Если слой золота на плате слишком толстый, избыток золота может диффундировать в припой Au80Sn20 при монтаже компонентов (в случае его использования), изменяя процентное соотношение припоя, что приводит к увеличению температуры плавления, ухудшив качество соединения компонентов.

Для подложек, на которые монтируются СВЧ-кристаллы и пассивные элементы покрытие ENIG приемлемо, а для зон термозвукового монтажа проволоки используется покрытие ENEPIG, которое является универсальным и самым надежным для СВЧ устройств. Данное покрытие состоит из трех слоев, наносимых поверх медной дорожки:

- никель (Ni) толщиной 3-6 мкм (служит барьерным слоем, предотвращающим диффузию меди);

- палладий (Pd) толщиной 0,05-0,15 мкм (критически важный слой, который защищает никель от коррозии);

- золото (Au) толщиной 0,03-0,05 мкм (сверхтонкий защитный слой от окисления). Палладиевая прослойка исключает появление эффекта «черной площадки» и обеспечивает максимальную

прочность при тесте на отрыв. Таким образом, покрытие является универсальным для обеспечения монтажа на припой Au80Sn20 и монтажа золотой проволоки методом термозвуковой сварки.

Как известно, процесс термозвуковой сварки начинается с процесса формирования шарика на конце золотой проволоки электроискровым оплавлением [3,4]. При этом диаметр формируемых шариков должен строго контролироваться. Выбор диаметра золотой проволоки определяется прежде всего размером контактной площадки, т.к. присоединяемый шарик должен вписываться в размер контактной площадки (рис. 1). Рассмотрим в качестве примера кристалл усилителя QA1009DP ф.Qorvo.

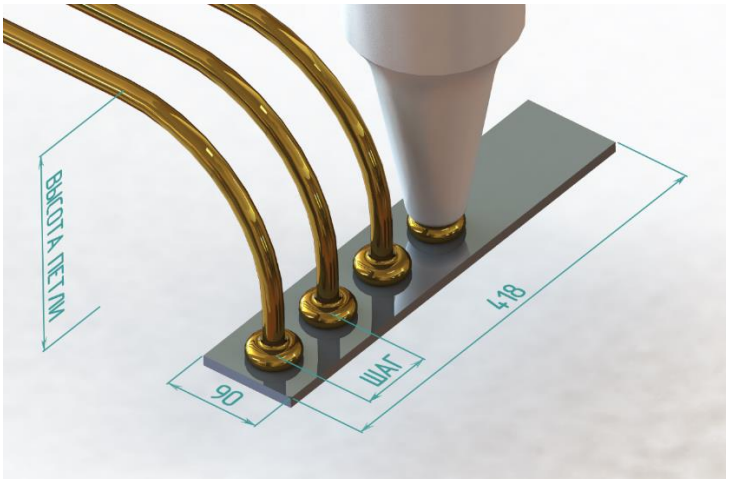


Рисунок 1. Расположение выводов на контактной площадке 418*90 мкм питания кристалла QA1009DP

Из технических характеристик и рекомендаций по монтажу [5] видно, что для межсоединений рекомендуется золотая проволока диаметром 17,5 мкм, а на контактных площадках 5 и 11 (цепь питания кристалла усилителя) расположены по шесть выводов на контактную площадку 418*90 мкм. Стандартным диаметром сформированного(оплавленного) шарика является 1,8-2,0 диаметра проволоки. Значит, диаметр шарика должен быть в пределах 31,5-35 мкм. Под воздействием приложенного усилия и ультразвуковой энергии шарик на контактной площадке сплющивается и исходный диаметр увеличивается на 10-11 мкм. Таким образом, на контактной площадке должны уместиться шесть сварных точек диаметром 46 мкм (под максимальный диаметр исходного шарика) на длине 418 мкм. Дополнительная трудность возникает из необходимости обеспечения зазора(шага) между сварными точками, чтобы сварной капилляр не наступил на соседнюю точку и не смял вывод (рис.1). Нетрудно подсчитать, что при шаге 28 мкм и размере сварной точки 46 мкм, общая цепочка соединений требует 416 мкм. Очевидно, что с учетом погрешности позиционирования современного автомата присоединения выводов ± 2 мкм, необходимо снижать диаметр исходного шарика до 1,8 диаметра проволоки.

Следующим шагом является правильный выбор сварочного капилляра под данный диаметр проволоки 17,5 мкм. Производителей капилляров под термозвуковую сварку методом «шарик-клин» достаточно много, таких как SPT(Швейцария), PECO (Ю.Корея), DO YEE (Сингапур) и другие. Из каталога DO YEE [6] наиболее подходящим капилляром для сборки является UA-2330M-2XL(CBS-OR8-T58-BH152). Данный капилляр длиной 11,1 мм и утоненным торцем 58 мкм предназначен для ультрамелкого шага. При выборе капилляра нужна особая внимательность, поскольку размеры приводятся как в дюймах, так и в микронах.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ПРИСОЕДИНЕНИЯ ЗОЛОТОЙ ПРОВОЛОКИ В MATLAB

Экспериментальные данные, полученные на установке ЭМ-4550 для образования шарика на конце золотой проволоки диаметром 17,5 мкм и режимы присоединения проволоки следующие:

- диаметр образуемых шариков: 30-35 мкм;

- ток разряда: 15-20 мА;

- время разряда: 0,6-1,1 мс.

Режим присоединения первой точки (встык «шариком»), площадки кристалла золотые:

- усилие: 12-18 г;

- мощность ультразвука: 30-45 мВт, частота 133 кГц;

- время ультразвукового импульса: 10-15 мс.

Режим присоединения второй точки («клин»), площадки золотые и ENEPIG:

- усилие: 18-25 г;

- мощность ультразвука: 50-70 мВт, частота 133 кГц;

- время ультразвукового импульса: 12-18 мс.

Когда капилляр автомата ЭМ-4550 прижимает золотую проволоку к контактной площадке платы и подает импульс ультразвука при температуре 180–200 °C, происходит следующее.

Ультразвуковая энергия за время воздействия «перемешивает» атомы соединяемых материалов на стыке. Поскольку верхнее иммерсионное золото на плате очень тонкое (всего 0,03–0,05 мкм), капилляр фактически продавливает его, и золотая проволока вступает в прямой контакт со слоем палладия. Золото и палладий обладают идеальной взаимной растворимостью. Атомы золота из проволоки диффундируют в слой палладия, а атомы палладия — в золото. В результате этой контролируемой диффузии образуется прочный металлический переход Au-Pd (интерметаллид). Именно этот слой обеспечивает высокую прочность клиновой сварки при тесте на отрыв.

В обычном покрытии ENIG (где палладия нет) атомы никеля при нагреве платы во время пайки или термозвуковой сварки стремятся диффундировать сквозь пористое золото на его поверхность. Там никель мгновенно окисляется, создавая пленку оксида никеля, ухудшающая поверхность присоединения.В структуре ENEPIG слой палладия (особенно аморфный палладий с добавлением 3-5% фосфора, используемый ведущими производителями) имеет такую кристаллическую решетку, которая полностью блокирует миграцию атомов никеля. Никель остается запертым в своем нижнем слое и не может испортить зону сварки.

Как известно [7], классическое уравнение Аррениуса описывает диффузию атомов, молекул в зависимости от энергии активации и температуры. Оно предполагает, что для преодоления энергетического барьера Q атому нужна только тепловая энергия- скорость диффузии увеличивается при увеличении температуры. С другой стороны, образуемые дефекты решетки снижают энергетический барьер Q, что также увеличивает скорость диффузии (намного больше, чем увеличение температуры):

$$D = D_0 * e^{\left(\frac{-Q}{R*T}\right)},$$

где D – коэффициент диффузии, D_0 – предэкспоненциальный множитель, Q – энергия активации диффузии, R – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура.

Для моделирования процесса ультразвукового присоединения необходимо использовать модифицированное уравнение, учитывающее снижение барьера энергии активации за счет энергии ультразвука в зоне контакта, приложенного статического усилия к проволоке.

$$D_{us} = D_0 * e^{\left(\frac{-(Q-\Delta Q_{us}(P,U))}{R*T}\right)},$$

где $\Delta Q_{us}(P,U)$ – снижение энергии активации за счет поглощения ультразвука в зоне формируемого контакта. По расчетным данным изменение $\Delta Q_{us}(P,U)$ составляет порядка 15 кДж/моль, зависящее от степени деформации и ее скорости в процессе присоединения.

Экспериментально установлено, что снижение энергии $\Delta Q_{us}(P,U)$ является не только функцией нагрузки и амплитуды ультразвуковых колебаний, но и функцией деформации проволоки и времени, а также технологическое преимущество высокочастотного ультразвука (100 кГц и выше) перед классическим (60 кГц). Это происходит за счет увеличения циклов микросдвигов в единицу времени, чем обеспечивается более интенсивное «акустическое размягчение» кристаллической решетки (эффект Ланженекера). Это позволяет снизить температурный порог термозвуковой сварки со стандартных 230 ℃ до 170-180℃ без потери качества соединения.

Разработанный скрипт Matlab послойной диффузии структуры золото-палладий-никель позволил промоделировать глубину взаимной диффузии золота и палладия, а также оптимальное время присоединения до начала диффузии золота в никель что предотвращает излишнюю деформацию проволоки (рис.2).

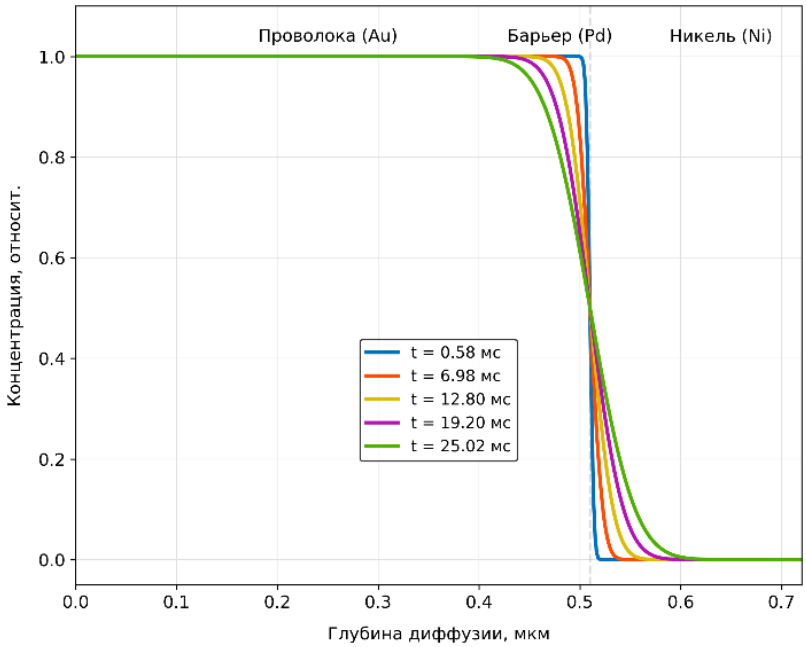


Рисунок 2. Глубина диффузии на границе золото-палладий в зависимости от времени ультразвукового воздействия

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных расчетных и экспериментальных данных покрытие ENEPIG рекомендуется в качестве альтернативы толстослойному золочению в силовой и высоконадежной электронике, обеспечивая расширенный ресурс работы межсоединений в жестких температурных режимах.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ламинаты RT6035HTC.Режим доступа: https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/rt-duroid-laminates/rt-duroid-6035htc-laminates. Дата доступа: 12.09.2026.

[2] Особенности формирования межсоединений в СВЧ микроблоках / В. Л. Ланин [и др.] // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 27-й Международной конференции, Севастополь, 10-16 сент. 2017 г. /Севастопольский государственный университет. – Севастополь, 2017. – С. 882–886.

[3] Технология и оборудование микросварки в производстве изделий электронной техники /И.Б. Петухов, В.Л. Ланин, В.А. Емельянов. – Минск: Интегралполиграф, 2021. –186 с.

[4] Ланин, В. Л. Термозвуковое присоединение медной проволоки к контактным площадкам / В. Ланин, И. Петухов // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2011. – № 2 (00031). – С. 132–137.

[5] QPA100D.Режим доступа: https://www.qorvo.com/products/p/QPA1009D. Дата доступа: 12.09.2026.

[6] Bonding capillary. Режим доступа:https://www.douyee.com/kq/catalogues. Дата доступа: 12.09.2026

[7] Mehrer, H. Diffusion in Solids. Fundamental, methods, materials, diffusion-controlled processes / H. Mehrer / Springer Berlin Heidelberg New York, 2007.– P.651.

MODELLING THE THERMOSONIC BONDING PROCESS FOR MICROWAVE DEVICE ON ENEPIG SUBSTRATES

I. Petuhov

OJSC «Planar-SO», Minsk, Belarus, igorpetuchov@mail.ru

Abstract: a mathematical model of diffusion kinetics has been developed for the thermosonic bonding of 17.5 μm diameter gold wire to a Rogers 6035HTC substrate with an ENEPIG finish. The model demonstrates the high barrier efficiency of a 100 nm palladium layer during ball-wedge thermosonic wire bonding at temperatures of 180–200°C. Matlab simulations indicate that ultrasonic intensification facilitates the formation of a robust bond.
Keywords: wire interconnects, ENEPIG finish, thermosonic bonding, microwave amplifier substrate.